

Método para calcular la resistencia a la propulsión de las naves, o sea, la potencia en caballos efectivos (E. H. P.) por medio del ensayo de modelos en estanques de experimentación

ESTE método, que consiste en calcular la resistencia o caballos efectivos de potencia requeridos para la propulsión de una nave a tamaño natural, por medio de resultados experimentales con modelos, es, sin lugar a dudar, el más seguro de todos. El empleo de estanques de experimentación se ha generalizado mucho durante estos últimos años, y el método, a la vez de ser sumamente interesante porque permite la investigación de nuevos diseños y de nuevos problemas, es ventajoso y económico, porque se puede hacer rápidamente la investigación de los efectos producidos por alteraciones en la forma o dimensiones del buque. De este modo, se pueden efectuar importantes economías en la propulsión con un costo relativamente pequeño.

Sólo en muy pocos casos se han efec-

tuado experimentos con buques a tamaño natural. Generalmente, tales experimentos se han limitado a modelos cuya eslora no es mayor de 20'-0". Para determinar la resistencia de un buque de la de su modelo, es necesario emplear velocidades para el modelo que correspondan a las velocidades del buque, es decir, que debe hacerse uso de la ley de «velocidades correspondientes». Al comparar buques similares con sus respectivos modelos, las velocidades deben ser proporcionales a las raíces cuadradas de sus dimensiones lineales. Así, por ejemplo, sea 210'-0" la eslora del buque que vamos a tratar, 10 nudos su velocidad por hora y 10.5' la eslora del modelo. La razón de las dimensiones lineales es $\frac{210}{10,5} = 20$. De manera que la velocidad del modelo que corresponde a

tuado experimentos con buques a tamaño natural. Generalmente, tales experimentos se han limitado a modelos cuya eslora no es mayor de 20'-0". Para determinar la resistencia de un buque de la de su modelo, es necesario emplear velocidades para el modelo que correspondan a las velocidades del buque, es decir, que debe hacerse uso de la ley de «velocidades correspondientes». Al comparar buques similares con sus respectivos modelos, las velocidades deben ser proporcionales a las raíces cuadradas de sus dimensiones lineales. Así, por ejemplo, sea 210'-0" la eslora del buque que vamos a tratar, 10 nudos su velocidad por hora y 10.5' la eslora del modelo. La razón de las dimensiones lineales es $\frac{210}{10,5} = 20$. De manera que la velocidad del modelo que corresponde a

los 10 nudos por hora del buque será

$$\frac{10}{\sqrt{20}} = 2.23 \text{ nudos.}$$

Así, obtendremos la velocidad por la cual debe probarse el modelo. A fin de determinar la resistencia del buque de la de su modelo, debemos efectuar las siguientes operaciones:

1.º Determinar la resistencia total del modelo.

2.º Calcular la resistencia friccional.

3.º Determinar la resistencia residual a la «velocidad correspondiente», restando la resistencia friccional de la total.

En seguida, por medio de la ley de comparación, de Froude, se puede determinar la resistencia residual del buque. Esta ley es como sigue: Si la dimensión lineal del buque es l veces la dimensión del modelo, y si las resistencias de este último a las velocidades V_1, V_2, V_3 , etc., son R_1, R_2, R_3 , etc., entonces a las «velocidades correspondientes» del buque $V_1 \sqrt{l}, V_2 \sqrt{l}, V_3 \sqrt{l}$, etc., las resistencias del buque serán $R_1 l^3, R_2 l^3, R_3 l^3$, etc.

Habiendo efectuado las operaciones anteriores, se obtiene la resistencia total del buque, calculando:

1.º Las resistencias friccionales del buque a varias velocidades.

2.º Las resistencias residuales del buque de las del modelo a varias velocidades.

3.º Sumando los resultados de 1 y 2 a las respectivas velocidades.

Con estos resultados se construye una curva empleando las velocidades como abscisas. Esta curva lleva generalmente el nombre de «curva de resistencia».

Se ve, de lo que antecede, que para determinar la resistencia de un buque, de forma conocida, es necesario determinar la resistencia de un modelo del buque construido a una escala conveniente. De esta resistencia total se deduce la

resistencia residual r_w del modelo, restandole el valor de la resistencia friccional r_f . En seguida, aplicando la ley de comparación, se obtiene el valor de la resistencia residual R_w del buque a la velocidad correspondiente.

Este trabajo se efectúa en un estanque experimental, o más bien dicho, en un «estanque de resistencia».

El ejemplo que damos a continuación, es el resultado de experimentos efectuados por el suscrito en la Universidad de Michigan, E. U. Demás está decir que, aunque en este caso se trata de un vapor para navegar en los ríos, el método de efectuar los cálculos es igual para cualquier tipo de nave.

Con el objeto de no hacer este artículo demasiado extenso, no describiremos en detalle el estanque empleado en esa Universidad, y nos limitaremos a dar sus características principales:

Largo, 300'—0"; ancho, 22'—0", y profundidad 10'—0". Los modelos que se emplean en ese laboratorio son de parafina sólida de 10 a 12'—0" de eslora. Se ha preferido este material por su menor costo. En algunos estanques de experimentación se emplean modelos hasta de 20'—0" de eslora y en su confección suele también emplearse la madera. Siempre que la temperatura sea inferior a 75° F. no se experimentan dificultades con el empleo de la parafina sólida.

Se remolca el modelo en el agua tranquila del estanque a un cierto número de velocidades que comprenda a la que se desea dar al buque. Las resistencias totales a diversos calados y velocidades se miden por medio de un dinamómetro, el cual se muestra diagramáticamente en la fig. 4.

MANERA DE OPERAR CON LOS RESULTADOS

1.º En la Tabla N.º 1 se dan los valores de las resistencias totales. Trazando

estos valores como ordenadas, y las velocidades como abscisas, se construyen las curvas de resistencias totales del modelo, como se indica en la fig. 1.

En seguida determinamos la resistencia friccional del modelo a diversos calados y velocidades, como se indica en la Tabla N.º 2. Para estos cálculos hemos empleado la fórmula r_f (resistencia friccional) = $f A v^n$, siendo f el coeficiente de fricción, A la superficie mojada en pies cuadrados, v la velocidad en nudos por hora y n una constante que en este caso la hemos tomado igual a 1,94.

Con los valores de la Tabla N.º 2 se construyen las curvas de resistencias friccionales, que se muestran también en la fig. N.º 1,

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL BUQUE EMPLEANDO LOS RESULTADOS DEL MODELO

Lo que se desea es determinar por medio de los resultados del modelo una curva de caballos efectivos de potencia (E. H. P.) para el buque a tamaño natural en la condición de carga completa que corresponde a un calado de 0.20'. De modo que tomaremos la curva de resistencia total a 0.20', que se muestra en la fig. 1. Al efectuar el experimento se lestró el modelo de modo que flotara en el agua dulce del estanque a la línea de agua correspondiente del buque en agua de mar. En este caso, la razón de resistencias a velocidades correspondientes que sigue la ley de Fronde, será de $\frac{36}{35}$

$\left(\frac{L}{l}\right)^3$ en lugar de $\left(\frac{L}{l}\right)^3$. El factor $\frac{36}{35}$ se introduce con motivo del paso de agua dulce a agua de mar. En la Tabla N.º 6 se se dan los cálculos del buque que estamos considerando.

EXPLICACIÓN DE LA TABLA N.º 6

La columna 1 representa las velocidades v en nudos del modelo. La N.º 2 contiene valores de r , o sea, de la resistencia total del modelo en libras correspondientes a las velocidades indicadas en la columna 1. Dichos valores se toman de la curva de resistencia total a 0.20', fig. N.º 1, o de la Tabla N.º 1. En la N.º 3 se entran valores de r_f , o sea, de la resistencia friccional del modelo, calculada como se ha descrito anteriormente. La columna 4 contiene las resistencias residuales r_w iguales a $r - r_f$. Es a esta resistencia a la que se aplica la ley de Fronde y de la cual se desea determinar en la forma más corta y simple los correspondientes caballos efectivos residuales. El valor de r_w no sólo representa la resistencia residual, sino que también contiene la resistencia debida a remolinos y la resistencia al aire del modelo. Se considera que ambas siguen la ley de comparación. Ahora bien, para el buque a tamaño natural, la resistencia residual en libras a velocidades correspondientes, es $r_w \times \frac{36}{35} \times \left(\frac{L}{l}\right)^3 = R_w$.

La velocidad V del buque corresponde a una velocidad, v , del modelo es

$$v \sqrt{\frac{L}{l}}$$

Los caballos efectivos absorbidos por $R_w = R_w \times 0.0030707 V$. Si se denotan por $E. H. P_w$ los caballos efectivos residuales del buque a tamaño natural, tendremos $EHP_w = R_w \times 0.0030707 V = r_w \times$

$$\frac{36}{35} \left(\frac{L}{l}\right)^3 \times 0.0030707 v \sqrt{\frac{L}{l}} = r_w \times v \times \frac{36}{35} \left(\frac{L}{l}\right)^3 \times 0.0030707 \sqrt{\frac{L}{l}}$$

La cantidad $\frac{36}{35} \left(\frac{L}{l}\right)^3 \times 0.003707 \times$

$\sqrt{\frac{L}{l}}$ se calcula de una sola vez, como se indica en el encabezamiento, y se denotará por a .

En la columna 5 se entran los valores de $a v$ y en la 6 los valores de EHP_w , que son iguales a r_w multiplicados en cada caso por $a v$. En la novena columna se anotan los valores de V , velocidades correspondientes para el buque y que se obtienen multiplicando cada valor

de v por $\sqrt{\frac{L}{l}}$. De este modo obtenemos para cierto número de valores de V los valores de EHP_w , o sean, caballos de potencia efectivos residuales.

Determinaremos ahora los caballos efectivos de potencia debidos a la fricción y los llamaremos EHP_f . Para determinar la resistencia friccional hacemos uso de la Tabla de Tideman y tomamos el coeficiente de fricción apropiado a la eslora del buque y a la naturaleza de la superficie de la obra viva. Se calcula la superficie mojada como se indica en la Tabla N.º 6.

La resistencia friccional en libras = R_f = superficie mojada \times coeficiente de fricción $\times V^{1.83}$ y
 $EHP_f = 0.003707 R_f \times V = 0.003707 \times$ superficie mojada \times coeficiente de fricción $\times V^{2.83}$.

Si se tiene una tabla de valores de $V^{2.83}$ se pueden determinar inmediatamente los valores EHP_f . En este caso los calculamos para 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 nudos por hora. Con estos valores construimos la curva EHP_f que se muestra en la figura 3. Ahora, valiéndonos de esta curva para valores de V correspondientes, columna 9, tomamos los valores de EHP_f y los entramos en la columna 7. La co-

lumna 8 es la suma de las 6 y 7 y da los valores de EHP totales. Con estos valores trazados sobre V correspondientes, columna 9, se construye la curva final de EHP para el buque cuyas características damos en el encabezamiento de la tabla 6. La columna 12 se forma tomando de la fig. N.º 3 valores de EHP que corresponden a los valores de V de de la columna 10.

Conociendo los EHP se pueden determinar los IHP , para lo cual hay que conocer el coeficiente de propulsión, que suele estimarse de 0,50 a 0,55.

$$IHP = \frac{E.H.P.}{0,50} \text{ o } \frac{E.H.P.}{0,55}$$

Los caballos al eje para máquinas a vapor se determinan tomándolos iguales a 0.90 de los caballos indicados

$$B.H.P. = 0.90 I.H.P.$$

RESISTENCIA RESIDUAL TRAZADA PARA EL ANÁLISIS

Hemos visto como se trazan las resistencias y se obtienen los $E.H.P.$ cuando se trata de determinar los caballos efectivos de potencia para un buque que se está diseñando o que se encuentra en servicio. Ahora bien, cuando se trata de analizar la resistencia residual entonces es conveniente expresarla en una forma ligeramente distinta. Un método muy conveniente es emplear valores de $\frac{V}{\sqrt{L}}$ como abscisas y Resistencia: Desplazamiento como ordenadas. Por conveniencia el valor de Resistencia: Desplazamiento se expresa como resistencia en libras. por tonelada. En las tablas 3, 4 y 5 se dan valores de resistencias en libras. por tonelada para tres distintos desplazamien-

tos. En la fig. 2 se muestran las curvas de Resistencia Residual en lbs. por tonelada trazadas sobre $\frac{V}{\sqrt{L}}$ para el modelo que hemos estado tratando.

Para analizar los resultados este sistema de trazarlos es el más instructivo y de mucha utilidad. Elimina la cuestión de dimensiones, esto es, que la Resisten-

cia dividida por el Desplazamiento es independiente del tamaño y se está, desde luego, en condiciones de aplicar la Ley de Comparación a dichos resultados.

Para efectuar los cálculos hemos seguido el método indicado en el texto «Speed and Power of Ships» del Almirante Taylor, E. U.

VAPOR DE RIO

Modelo-Eslora, $L=10.5'$; Manga, $B=1.75'$; Calados: $0,10'$, $0,15'$, $0,20'$.

Calados—Desplaz. en Lbrs.	Superf. Mojada—A
$0,10'$ — 93 Lbrs.	17.61 Pies cuadrados
$0,15'$ — 144.25 »	19.09 » »
$0,20'$ — 197.00 »	20.21 » »

TABLA N.º 1.—Resistencias Totales del Modelo

v NUDOS	v' Bies X minuto	$010'$ r	$015'$ r	$0.20'$ r
1.00	101.33	0.200	0.221	0.246
1.5	152.0	0.440	0.483	0.550
2.0	202.66	0.768	0.868	1.000
2.5	253.70	1.27	1.57	1.900
2.8	284.00	1.76	2.30	3.55

TABLA N.º 2.—Resistencias Friccionales del Modelo

v NUDOS	v' Pies X Minuto	$0.10'$	$0.15'$	$0.20'$	v^n
0.5	50.60	0.0374	0.0406	0.043	0.229
1.0	101.33	0.1635	0.1720	0.188	1.000
1.5	152.00	0.360	0.391	0.414	2.200
2.5	253.70	0.966	1.048	1.112	5.920
2.8	284.00	1.202	1.305	1.382	7.550
3.0	304.00	1.380	1.492	1.583	8.430

$n=1.94$ $f=0.00928$ para agua dulce

$r_f = f A v^n =$ resistencia debida a la fricción

$v' =$ Pies X Minuto = $101.33 \times v$.

TABLA N.º 3.—Resistencias del Modelo

Desplazamiento = 197 Lbrs.

Resistencia Residual en Libras × Tonelada =

$$\frac{R_w}{D} = \frac{r_w \times 2240}{\text{Desp. Modelo}} = \frac{r_w \times 2240}{197} = r_w \times 11.38$$

$$v = \sqrt{L} \times 0.3; v' \text{ (Pies} \times \text{minuto)} = \sqrt{L} \times 0.3 \times 101.30 = \sqrt{10.5'} \times 0.3 \times 101.33$$

$\frac{v}{\sqrt{L}}$	v' Pies × minuto	r	r_f	r_w	$\frac{R_w}{D}$
0.3	98.60	0.240	0.190	0.050	0.569
0.4	131.30	0.410	0.320	0.090	1.024
0.5	164.10	0.640	0.483	0.157	1.790
0.6	197.00	0.940	0.685	0.255	2.900
0.65	213.40	1.130	0.800	0.330	3.785
0.75	246.10	1.725	1.050	0.675	7.680
0.85	279.30	2.850	1.340	1.510	17.190

TABLA N.º 4.—Resistencias del Modelo

Desplazamiento = 144.25 Lbrs.

$$\frac{R_w}{D} = \frac{r_w \times 2240}{144.25} = r_w \times 15.53.$$

$\frac{v}{\sqrt{L}}$	v' Pies × minuto	r	r_f	r_w	$\frac{R_w}{D}$
0.3	98.60	0.213	0.170	0.043	0.666
0.4	131.30	0.360	0.295	0.065	1.009
0.5	164.10	0.560	0.455	0.105	1.630
0.6	197.00	0.818	0.650	0.168	2.610
0.65	213.40	0.970	0.755	0.215	3.338
0.75	246.10	1.430	0.990	0.440	6.840
0.85	279.30	2.170	1.270	0.900	13.990

TABLA N.º 5.—Resistencias del Modelo

Desplazamiento = 93 Lbrs.

$$\frac{R_w}{D} = \frac{r_w \times 2240}{93} = r_w \times 24.07.$$

$\frac{v}{\sqrt{L}}$	v' Pies×minuto	r	r_f	r_w	$\frac{R_w}{D}$
0.3	98.60	0.190	0.160	0.030	0.723
0.4	131.30	0.330	0.278	0.052	1.253
0.5	164.10	0.510	0.420	0.090	2.166
0.6	197.00	0.730	0.600	0.130	3.13
0.65	213.40	0.850	0.690	0.160	3.850
0.75	246.10	1.170	0.920	0.250	6.035
0.85	279.30	1.670	1.170	0.500	12.040

TABLA N.º 6

Cálculos de los caballos efectivos de potencia = EHP .

N.º del Modelo N.º del experimento Representa: Vavor de río.

Condiciones { Asiento: Calado uniforme.
Apéndice: No.

Eslora media sumergida = Buque, $L = 210' - 0''$, Modelo = $l = 10.5'$.Razón lineal — Del buque al modelo = $\frac{L}{l} = 20$ Factores — Para velocidad $\sqrt{\frac{L}{l}} = 4.472$. Para superficies = $\left(\frac{L}{l}\right)^2 = 400$ Para desplazamiento = $\left(\frac{L}{l}\right)^3 = 8000$ Factor de resistencia: Buque en agua de mar = $\frac{36}{35} \left(\frac{L}{l}\right)^3 = 8228.6$

Desplazamientos: Del Modelo en agua dulce: 197 Lbrs., 144.25 Lbrs., 93 Lbrs.

Del buque en agua de mar: 824 Tons., 530 Tons., 342 Tons.

Superficies mojadas: Modelo — 17.61 pies cdr., 19.09 pies cdr., 20.21 pies cdr.

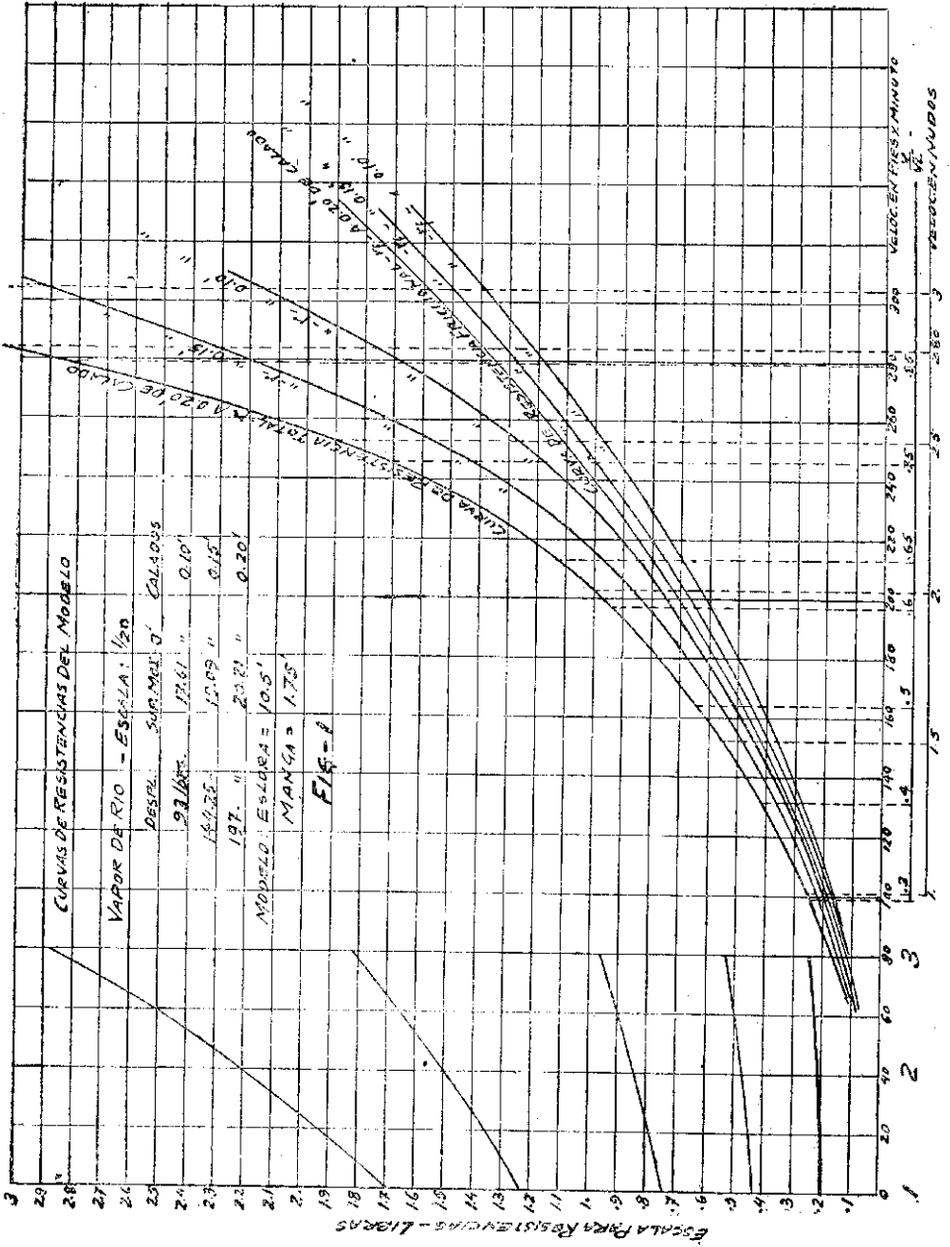
Buque = 7050 » » 7649 » » 8084 » »

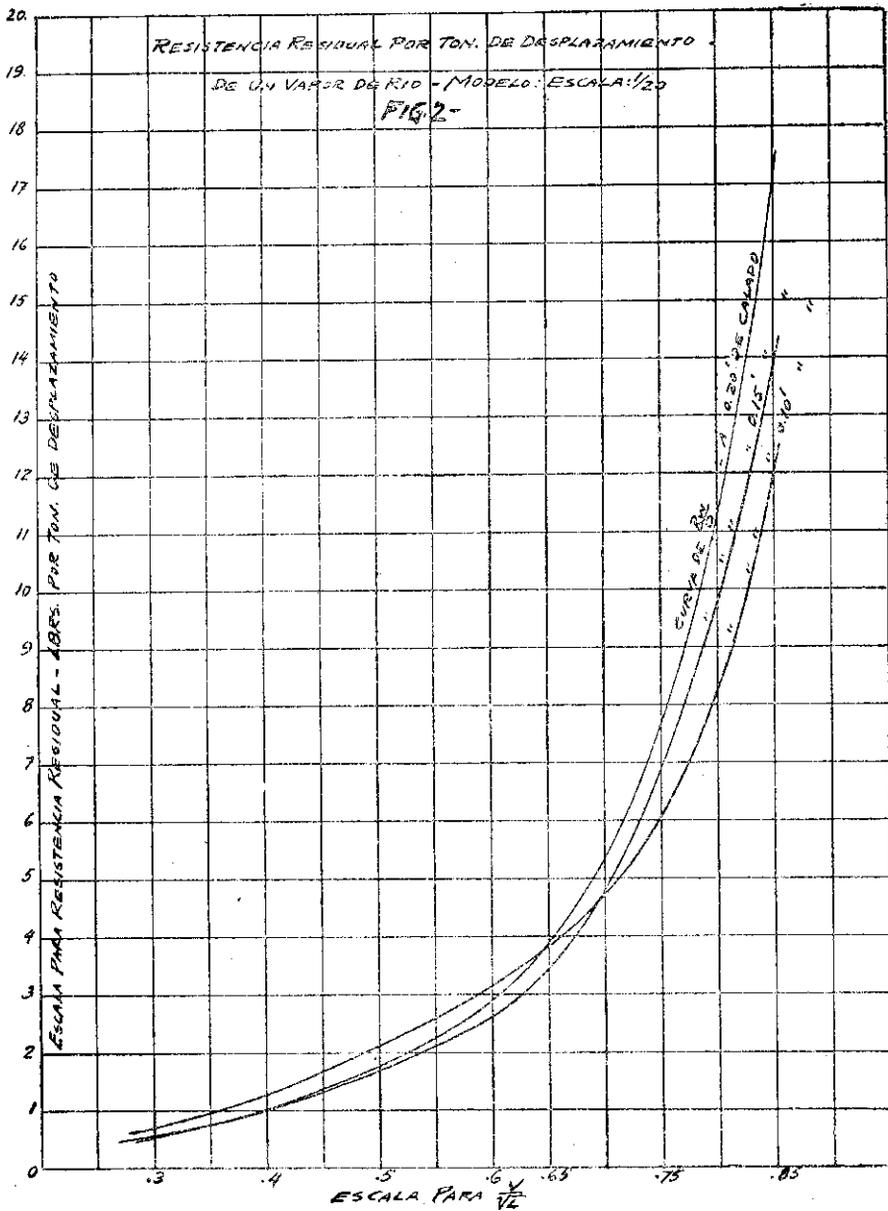
 $EHP_f = 0.0030707 \times 0.00901 \times 8084 \times V^{2.83} = 0.224 V^{2.83}$

$$\alpha = \frac{36}{35} \times \left(\frac{L}{l}\right)^3 \times 0.0030707 \times \sqrt{\frac{L}{l}} = 113$$

CONTINUACIÓN DE LA TABLA N.º 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
v	r	r_f	r_w	αv	EHP_w	EHP_f	EHP_t	v Corres.	V	EHP_f	EHP
1	0.246	0.188	0.058	113	6.55	15.7	22.25	4.47	4	11.42	
1.5	0.550	0.414	0.136	169.6	23.10	48.9	72.00	6.70	5	21.30	31
2.0	1.000	0.726	0.274	226.0	61.90	106.0	168.00	8.84	6	35.60	55
2.5	1.900	1.112	0.788	283.0	223.0	209.0	432.00	11.19	7	55.10	83
2.8	3.55	1.382	2.168	316.0	685.0	285.0	970.00	12.51	8	80.60	118
3.0									9	110.25	170
									10	151.5	255





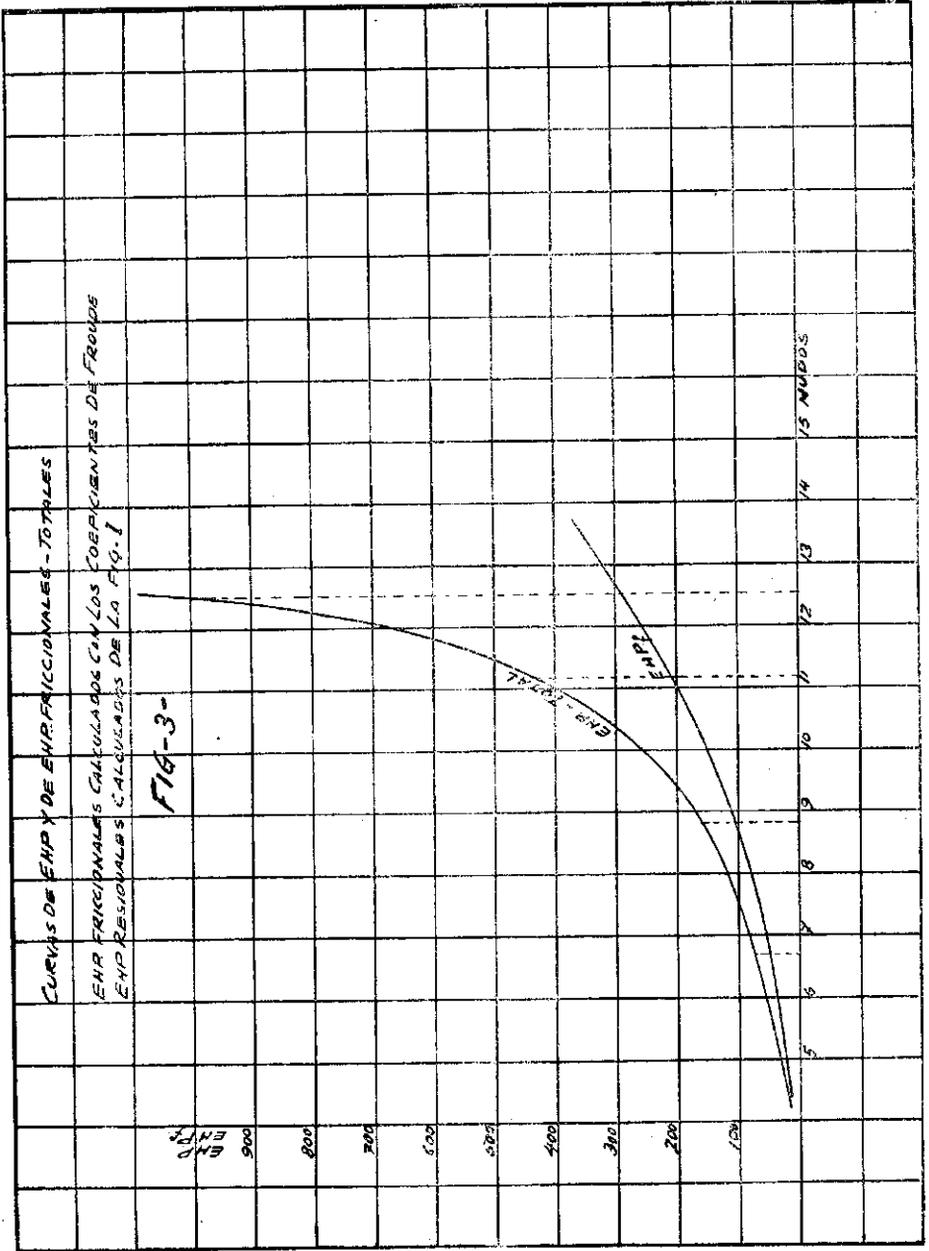


FIG-4

