

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE MONTERREY

ESCUELA DE INGENIERÍA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACION DE  
UN SISTEMA PARA LA DETERMINACION DE  
PERFILES DE VELOCIDAD DE FLUIDOS  
no-NEWTONIANOS

TESIS PROFESIONAL  
INGENIERO QUIMICO ADMINISTRADOR

VICENTE ALFONSO RAMIREZ USECHE

MONTERREY, N. L., MEXICO

JUNIO DE 1965

T  
TA357  
R3  
c.1



1080080479

A MIS PADRES, como una muestra más de mi  
gran cariño y eterna gratitud



A MIS HERMANOS, CUÑADOS Y SOBRINOS  
con cariño y por todo

**BIBLIOTECA**  
GRUPO CYDSA FID. A-1-73 FIFOSA

BMU Raúl Rangel Fria  
UANL  
FONDO  
TESIS  
(80479)

BU Raúl Rangel Fria  
UANL  
FONDO  
TESIS LICENCIATURA

A MI AHIJADO GILBERTO FRANCISCO ARRIECHE REQUENA, como ejemplo

A MIS COMPAÑEROS DE GENERACION, con  
afecto y alta estimación

A MIS COMPATRIOTAS EN MONTERREY, con mi amistad.

La parte experimental del presente trabajo de tesis se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Química del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México, bajo la dirección del Sr. -- Ing. Héctor López Ramos, M. Ch. E., a quien se agradece su guía y consejos.

## R E S U M E N

Los flúidos no-Newtonianos se diferencian de los Newtonianos en que estos siguen la Ley de Newton de viscosidades y aquellos presentan un comportamiento diferente. Esta razón fué la que generó la idea de estudiar experimentalmente el comportamiento de los flúidos no-Newtonianos, en escala laboratorio, fluyendo en ductos. Para tal fin, se pensó en diseñar un equipo o sistema del cual se pudieran obtener datos experimentales que, previo tratamiento, suministrarían la información necesaria para observar las distribuciones de velocidad del flúido fluyendo en un ducto, en determinadas condiciones de operación.

En este trabajo se persiguió, precisamente, - observar el comportamiento de este tipo especial de flúidos con objeto de tener una información para estudios - posteriores del mismo problema y poder dar conclusiones más exactas en cuanto al equipo diseñado y construído - con fines de investigación.

El flúido no-Newtoniano que se estudió fué - una solución acuosa de ~~carb~~boximetilcelulosa (CMC) al 0.4% en peso.

De manera general el sistema diseñado, cons--  
truído y operado para la determinación de los perfiles  
de velocidad de un fluido no-Newtoniano, reveló un com-  
portamiento adecuado para equipos de este tipo.

# I N D I C E

	<u>PAGINA</u>
RESUMEN	i
INDICE	iii
NOMENCLATURA	v
INTRODUCCION	1
TEORIA SOBRE FLUIDOS no-NEWTONIANOS	3
DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL APARATO	8
I- Consideraciones Generales	8
II- Descripción del aparato y del equipo adicional	8
OPERACION:	11
Descripción del procedimiento experimental	11
DATOS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS	15
I- Tablas de datos experimenta-- les	15
II- Tratamiento de los datos	19
III- Tablas de resultados	21
IV- Figuras que relacionan los re sultados	27
DISCUSION, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33

	<u>PAGINA</u>
BIBLIOGRAFIA	38
APENDICE I      Cálculos para determinar $n'$ y K	39
APENDICE II     Ejemplificación del cálculo de $N_{Re}'$	43
APENDICE III    Cálculo de las velocidades lo- cales	44
APENDICE IV     Curva calibración del Pitot con CMC	45
APENDICE V      Curva calibración del Pitot con Agua	46
APENDICE VI     Gráfica para determinar $n'$ y K	47

## NOMENCLATURA

g	Aceleración de gravedad, $\text{cm}/\text{seg}^2$
h	Altura de la columna de líquido en el viscosímetro capilar, cm
$\Delta h$	Valor absoluto de las diferencias de lecturas instantáneas de los manómetros, cm
K	Indice de consistencia del fluido, $\text{g}/\text{cm seg}^2 (\text{seg})^{n'}$
n	constante de Deissler
n'	Indice de comportamiento del fluido no-Newtoniano
$N_{Re}$	Número de Reynolds, adimensional
$N_{Re}'$	Número de Reynolds generalizado, adimensional
$\Delta P$	Diferencias de presión en la determinación de n' y K con el viscosímetro capilar, $\text{dinas}/\text{cm}^2$
Q	Gasto de fluido, $\text{cm}^3/\text{seg}$
R	Radio de la sección de prueba, cm
r	Distancia radial, mm.
$s^+$	$[(R-r)(\tau_0 \rho)^{\frac{1}{2}}] / \mu$ adimensional
$\bar{v}_z$	velocidad instantánea en un punto, $\text{cm}/\text{seg}$
$\bar{v}_{z, \text{máx.}}$	velocidad promedio en el centro del tubo, $\text{cm}/\text{seg}$
w	gasto de fluido, $\text{g}/\text{seg}$ .

$w'$             Peso del fluido, g.

Letras griegas:

$\gamma'$  = viscosidad generalizada,  $\text{cm}^{n'} (\text{cm}/\text{seg})^{2-n'} \text{g}/\text{cm}^3$

$\rho$  = densidad,  $\text{g}/\text{cm}^3$

$\rho_t$  = factor de densidad para los manómetros, adimensional

$\tau_0$  = Esfuerzo al corte en la fase sólido-líquido,  $\text{g}/\text{cm seg}^2$

$\theta$  = Angulo de inclinación del manómetro con el plano horizontal

$\mu$  = viscosidad,  $\text{g}/\text{cm seg}$ .

## I N T R O D U C C I O N

Para flúidos en flujo laminar estable es muchas veces posible predecir teóricamente la distribución exacta de velocidad en el flúido fluyendo en geometrías simples, como por ejemplo: tubos rectos con sección transversal circular, anulares concéntricos, rectangulares o elípticos (1). Para calcular tales distribuciones de velocidad, es necesario que el "flujo de momentum turbulento" sea expresado de un modo exacto. Tales expresiones están dadas por las leyes de viscosidad de Newton para flúidos Newtonianos y por un número de modelos empíricos para flúidos no-Newtonianos (1).

En el caso de flujo turbulento estable, no ha sido posible predecir exactamente la gráfica de distribución de velocidad promedio del flúido por la naturaleza compleja del "flujo de momentum turbulento". Sin embargo, se han encontrado un número de relaciones empíricas o semi-empíricas para describir las distribuciones de velocidad promedio. Para ilustrar de un modo elemental la naturaleza del flujo turbulento y compararla con la del flujo laminar, se midieron las distribuciones de velocidad, analizándolas subsecuentemente, para un líquido fluyendo a través de un ducto de paredes lisas y

en condiciones turbulentas y a varias velocidades de --  
flujo.

## T E O R I A (1)

De las relaciones empíricas que se han propuesto para describir el flujo de "momentum" turbulento, aquellas de Prandtl (2) y Deissler (2), se han encontrado útiles para describir la distribución de velocidades para líquidos no-compresibles fluyendo en ductos. Estas dos relaciones empíricas, combinadas con la ecuación de movimiento promedio (2) y datos experimentales, proporcionan las siguientes expresiones para las distribuciones de velocidad promedio a números de Reynolds mayores de 20,000 (1).

$$v^+ = s^+, \quad 0 < s^+ < 5 \quad (i)$$

$$v^+ = \int_0^{s^+} \frac{ds^+}{1 + 0.0154 v^+ s^+ [1 - \exp(-0.0154 v^+ s^+)]} \quad (ii)$$

para  $0 < s^+ < 26$

y 
$$v^+ = \frac{1}{0.36} \ln s^+ + 3.8 \quad (iii)$$

para  $s^+ > 26$ .

donde:

$$s^+ = \text{Número adimensional} = \left[ (R-r)(\tau_0 \rho)^{\frac{1}{2}} \right] / \mu$$

R = radio del tubo

r = distancia radial

$$v^+ = \left[ v_z(\rho)^{\frac{1}{2}} \right] / (\tau_0)^{\frac{1}{2}}$$

$\bar{v}_z$  = velocidad promedio a una distancia radial r

$\tau_0$  = esfuerzo de corte en la interfase sólido-líquido

$\rho$  = densidad del fluido

$\mu$  = viscosidad del fluido.

Bird, Stewart y Lightfoot (1), resumen las ecuaciones (ii) y (iii), en forma gráfica.

Schlichting ha propuesto la siguiente ecuación empírica que se adapta a la curva para describir la distribución de velocidad a flujo constante en ductos circulares:

$$v_z = v_{z, \text{máx.}} \left( 1 - \frac{r}{R} \right)^{1/n} \quad (\text{iv})$$

donde:

n = constante.

$R$  = radio del tubo

$\bar{v}_z$  = velocidad promedio a una distancia radial  $r$

$\bar{v}_{z,m\acute{a}x}$  = velocidad promedio en el centro del tubo, es decir cuando  $r = 0$

La constante "n" ha sido encontrada por Schlichting que varía con el número de Reynolds como se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1.

Re	$4 \times 10^3$	$7.3 \times 10^4$	$1.1 \times 10^5$	$1.1 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$3.2 \times 10^6$
n	6.0	6.6	7.0	8.0	10.0	10.0

A pesar de ser extremadamente simple y en muchas formas conveniente, la expresión no es satisfactoria en algunos casos.

Uno de los métodos más simples para medir las velocidades en un punto de un fluido líquido, es utilizando un tubo de impacto.

Las velocidades locales en un punto están relacionadas a la diferencia de presiones entre la presión

del tubo de impacto y la presión estática en el fluido en el punto de impacto, medible con un manómetro diferencial, de acuerdo con la siguiente relación cuando am bas ramas del manómetro están en un mismo plano:

$$\bar{v}_z = \left[ 2 g \Delta h \rho_{\text{factor}} \text{Sen } \theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{v})$$

donde:

$g$  = aceleración de la gravedad

$\Delta h$  = valor absoluto de las diferencias de lecturas instantáneas del manómetro

$\theta$  = ángulo del manómetro con el plano horizontal

$v_z$  = velocidad instantánea en el punto

$\rho_{\text{factor}}$  = factor de densidad del manómetro

=  $(\rho_{\text{CCl}_4} - \rho_{\text{líqu.}}) / \rho_{\text{líqu.}}$ , para líquido sobre Tetracloruro de Carbono en el manómetro

=  $(\rho_{\text{líqu.}} - \rho_{\text{aire}}) / \rho_{\text{líqu.}}$ , para aire sobre líquido en el manómetro

$\rho_{\text{líqu.}}$  = densidad del líquido a la temperatura del manómetro

$\rho_{\text{aire}}$  = densidad del aire a la temperatura del ma

nómetro  
 $\rho_{\text{CCl}_4}$  = densidad del Tetracloruro de Carbono a la  
temperatura del manómetro.

Cuando las paredes de los brazos del manómetro están mojadas, como en el caso del experimento llevado a cabo en este trabajo, la ecuación (v) puede ser usada para relacionar la velocidad local promedio,  $\bar{v}_z$ , con el valor absoluto promedio de la diferencia de alturas del manómetro,  $\Delta h$ .

## DESCRIPCION Y CONSTRUCCION DEL APARATO

I- Consideraciones generales: siendo la Mecánica de flúidos una rama de suma importancia en la carrera de Ingeniería Química, era necesario dotar al laboratorio de fenómenos de transporte de un equipo adecuado para observar el comportamiento de los flúidos líquidos cuando están fluyendo en ductos de diferentes formas geométricas. Se resolvió construir el aparato que más adelante se describe, para hacer un intento de estudio acerca del flujo de flúidos no-Newtonianos, dotando de esta manera al citado laboratorio de un equipo modesto, pero adecuado, que permitiese al estudiante tratar de poner en práctica lo que pudo haber consultado en la literatura y a la vez familiarizarse con la compleja naturaleza de este tipo especial de flúidos líquidos.

### II- Descripción del aparato: (Ver Fig. 1)

El aparato consiste esencialmente de las siguientes partes:

- 1.- Una sección de prueba circular de longitud adecuada (60 diámetros) que está equipada con piezómetros ( $p_1$  y -

$p_2$  de la Fig. 1) y un tubo de impacto (Ver Fig. 2) paralelo al flujo con una toma de presión estática ( $p_3$ ).

2- Dos manómetros:

a) Líquido sobre Tetracloruro de Carbono ( $m_1$ )

b) Aire sobre líquido ( $m_2$ )

3- Fuente de líquido limpio

4- Equipo auxiliar:

a) Cronómetro

b) Termómetros

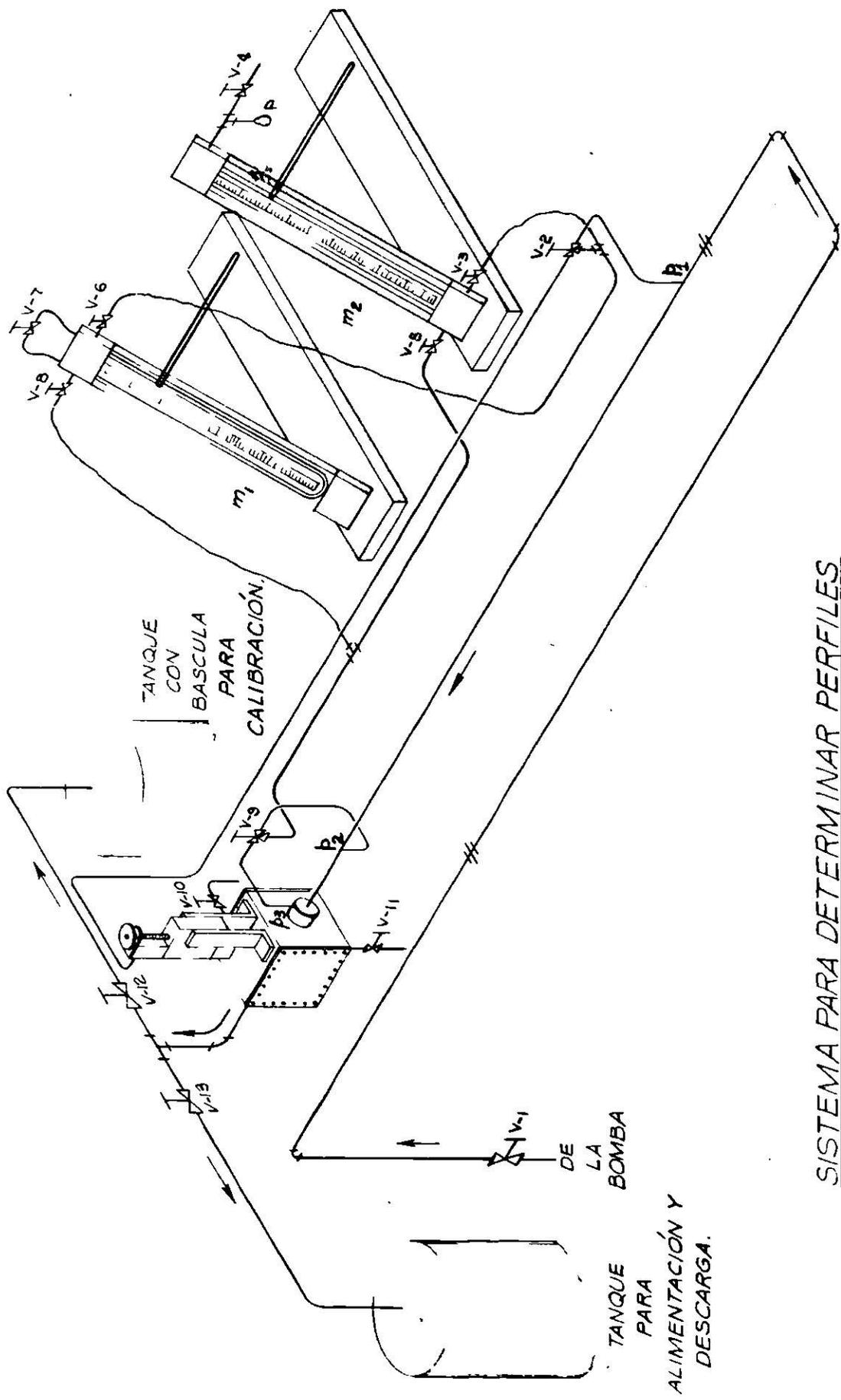
c) Bomba marca JACUZZI de  $\frac{1}{2}$  HP y 3450 r.p.m.

d) Tanques para alimentación y descarga del fluido de una capacidad de 210 litros.

5- Sección transparente acoplada a la sección de prueba a objeto de observar la presencia de burbujas que obstruyan las mediciones en forma correcta (Ver Fig. 3). Esta sección tenía<sup>?</sup> acoplado el sistema mecánico que permitía al medidor Pitot viajar a lo largo de la distancia diametral del tubo de prueba

y además dos válvulas: V-10 para purgas, y V-11 para descarga y limpieza.

Los detalles del diseño y construcción se - - muestran en las Figs. 2 y 3. Una vista general se muestra en la Fig. 1.



SISTEMA PARA DETERMINAR PERFILES DE VELOCIDAD DE FLUIDOS EN DUCTOS

I.T.E.S.M.	
DEPARTAMENTO DE ING. QUÍMICA	
RED DE TUBERÍAS	
TÉSIS VICENTE ALFONSO RAMÍREZ USECHE	
NO A ESCALA	JUNIO 1965
FIG. Nº 1	DIB. Nº 1

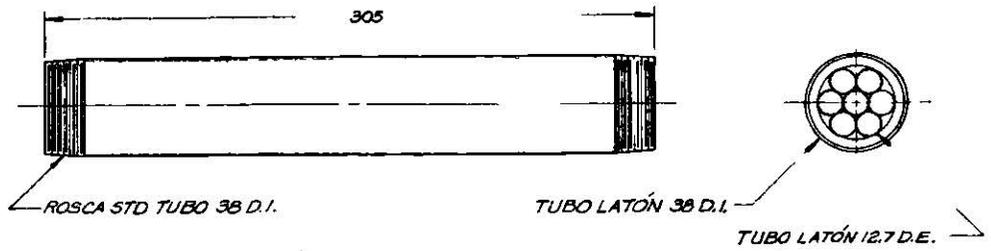


FIG. 2. - ENDEREZADOR DE FLUJO

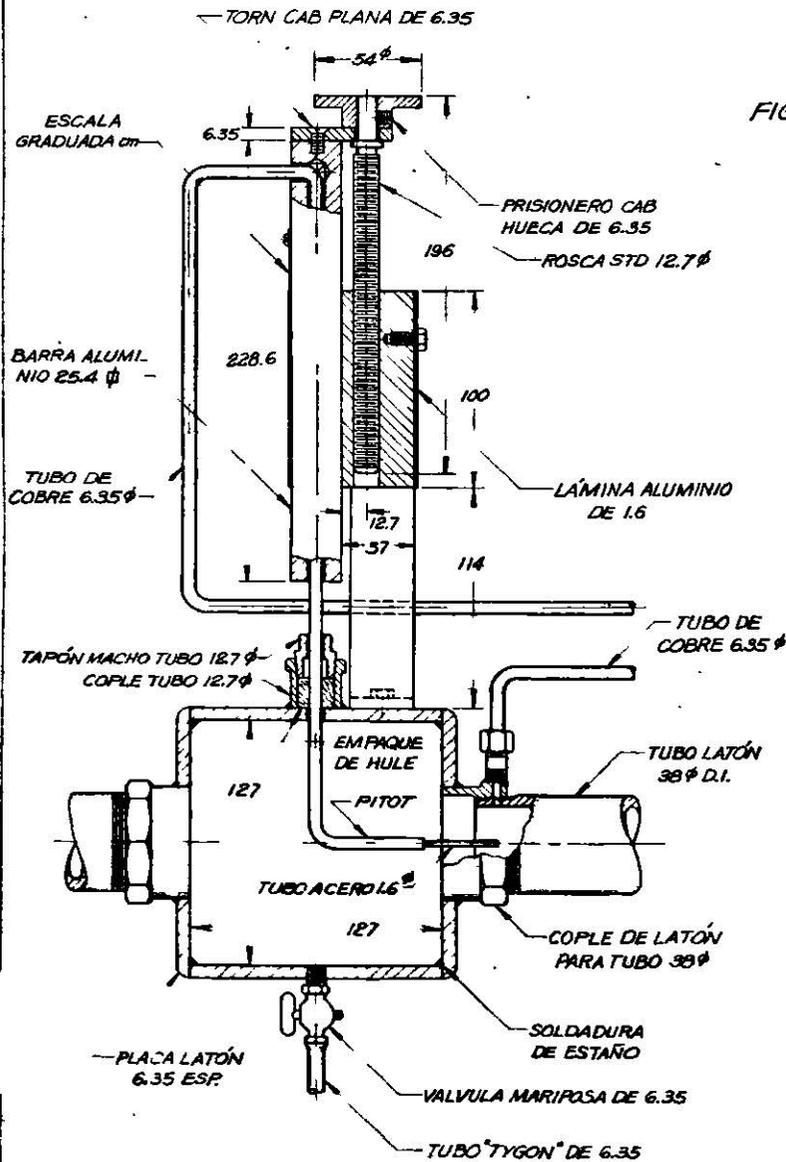
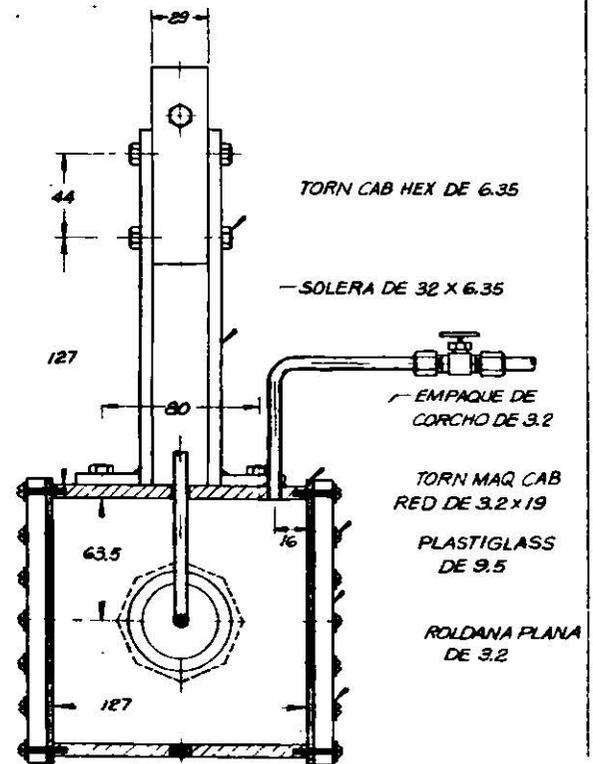


FIG. 3. - SECCIÓN DE PRUEBA



SISTEMA PARA DETERMINAR PERFILES DE VELOCIDAD DE FLUIDOS EN DUCTOS

I.T.E.S.M. DEPARTAMENTO DE ING. QUÍMICA		
<b>DETALLES</b>		
<b>TESIS VICENTE ALFONSO RAMÍREZ USECHE</b>		
ESC. 1:2	ACOT EN mm	JUNIO '65 DIB N° 2

## DESCRIPCION DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

- 1.- Se preparó la solución acuosa de Carboximetilcelulosa al 0.4 % en peso en 200 kilos de agua.
- 2.- Se determinaron las siguientes constantes de la solución:
  - a) Índice de comportamiento,  $n'$
  - b) Índice de consistencia, K

Esta determinación se hizo por medio de un viscosímetro de capilar. El procedimiento seguido y las gráficas que permitieron hacer los cálculos se reportan en el Apéndice I, y VI.

- 3.- Una vez calculadas las constantes de la solución (fluido no-Newtoniano), se procedió a la experimentación propiamente dicha.
- 4.- Se abrió lentamente V-1 a objeto de evitar cambios bruscos de presión.
- 5.- Se procedió a purgar las líneas de los manómetros de la siguiente manera:
  - a) Se comenzó con todas las válvulas cerradas - excepto V-1 la cual estaba abierta completamente, y se dejó que el fluido fluyera a través de la sección de prueba.

- b) Se giraron las válvulas V-2 y V-9 a la posición de los piezómetros, abriéndose V-6, V-7 y V-8. Cuando ya no se vieron más burbujas de aire en la sección transparente del tubo de prueba se cerraron V-6, V-7 y V-8. Se abrieron las válvulas V-3 y V-5. Cuando no hubo burbujas visibles en el manómetro se cerraron V-3 y V-5.
- c) Se giraron V-2 y V-9 a la posición del tubo de impacto y se abrieron V-6, V-7 y V-8. Cuando no hubo más burbujas de aire visibles en la sección transparente se cerraron V-6, V-7 y V-8. Se abrieron V-3 y V-5. Cuando no hubo más burbujas de aire visibles en el manómetro se cerraron V-3 y V-5.
- d) Efectuada la purga de las líneas de los manómetros se procedió a la calibración del medidor Pitot, siendo en esta parte de la experimentación donde se utilizó la báscula. La curva de calibración se muestra en el Apéndice IV.
- 6.- Obtenida la curva de calibración se procedió a variar la distancia radial del tubo de impacto a lo largo del diámetro de la sección de prueba.

La distancia recorrida fué de 30.0 mm dejándose un margen de seguridad de 8.1 mm para evitar posibles rupturas de la soldadura que unía al tubo de impacto con la toma de presión dinámica.

- 7.- Se tomaron las lecturas del manómetro de líquido sobre  $\text{CCl}_4$  para un gasto fijo. Las diferencias de alturas se dan en la Tabla 4.
- 8.- Las distancias radiales se consideraron en la siguiente forma:
  - a) Se tomó  $r = 0$  cuando el tubo de impacto estaba en el centro de la tubería.
  - b) Las distancias radiales hacia arriba se consideraron positivas y hacia abajo se consideraron negativas; esto se hizo a objeto de distinguir el sentido del movimiento del tubo de impacto a lo largo de la distancia diametral.
- 9.- Se obtuvieron valores de  $\Delta h$  para tres diferentes números de Reynolds.
- 10.- El mismo procedimiento descrito anteriormente se hizo para un fluido Newtoniano, que en este caso fué agua.
- 11.- Los datos experimentales se dan en la Tabla 5.
- 12.- Los perfiles de velocidad obtenidos se muestran

en las Figuras 4 a 9.

- 13.- Es necesario hacer notar que los perfiles de velocidad en la sección de prueba se determinaron midiendo las diferencias de presión entre el tubo de impacto y la toma de presión estática en el punto de impacto.

DATOS EXPERIMENTALES

Area transversal de la tubería 11.4 cm<sup>2</sup>

De los datos obtenidos en el viscosímetro de capilar para la Carboximetilcelulosa al 0.4 % en peso se encontró que:

Indice de comportamiento,  $n' = 0.782$   
 Indice de consistencia,  $K = 0.411$   
 Viscosidad generalizada,  $\gamma' = 0.261$   
 Densidad,  $\rho = 1.001 \text{ g/cm}^3$

TABLA 2  
 DATOS PARA LA CALIBRACION DEL PITOT CON CMC AL  
 0.4 % EN EL SISTEMA DE FLUJO .

$\Delta h$ , cm de CCl <sub>4</sub>	w', Kg	t, seg.	Q, cm <sup>3</sup> /seg
0.200	20.0	181.6	110
1.200	50.0	160.8	311
1.800	50.0	124.4	401
3.000	50.0	66.0	757
3.800	50.0	65.0	770
9.000	50.0	44.2	1,130
11.500	50.0	37.8	1,320
18.000	80.0	52.2	1,530
30.000	80.0	40.8	1,960
4.500	50.0	70.4	710
7.600	50.0	57.1	876
6.550	50.0	58.4	856

La curva de calibración correspondiente a la CMC al 0.4 % solución acuosa, se presenta en el Apéndice IV.

TABLA 3.

DATOS EXPERIMENTALES PARA LA CALIBRACION DEL PITOT CON AGUA EN EL SISTEMA DE FLUJO.

$\Delta h$ , cm,	$Q$ , $\text{cm}^3/\text{seg}$
4.20	631.0
5.00	826.0
8.80	1,075.0
9.80	1,219.0
12.30	1,282.0
15.80	1,408.0
17.20	1,470.0
19.30	1,613.0

La curva de calibración correspondiente al agua se presenta en el Apéndice V.

TABLA 4.

DATOS EXPERIMENTALES PARA LOS EXPERIMENTOS CON CMC AL 0.4 %.

r, mm	Exp. No. 1 $\Delta h$ , cm	Exp. No. 2 $\Delta h$ , cm	Exp. No. 3 $\Delta h$ , cm
+15.0	3.5	5.4	9.1
+14.5	3.7	5.8	9.5
+14.0	3.9	6.0	9.7
+13.0	4.1	6.2	10.5
+12.0	4.3	6.6	10.7
+11.0	4.5	7.0	11.0
+ 9.0	4.7	7.5	12.0
+ 6.0	5.1	8.3	12.9
+ 3.0	5.3	8.7	13.7
0.0	5.7	8.9	14.3
- 3.0	5.5	8.7	13.7
- 6.0	5.3	8.5	13.5
- 9.0	4.7	8.1	12.7
-11.0	4.3	7.7	12.1
-12.0	3.5	7.1	11.7
-13.0	3.3	6.9	11.1
-14.0	3.1	6.6	10.7
-14.50	2.9	6.3	10.3
-15.0	2.7	6.1	9.7
FLUJO	940 g/seg	1125 g/seg	1375 g/seg
$N_{Re}$	3,520	4,100	5,000

TABLA 5

DATOS EXPERIMENTALES DE LOS EXPERIMENTOS CON AGUA

r, mm	Exp. No. 1 $\Delta h$ , cm	Exp. No. 2 $\Delta h$ , cm	Exp. No. 3 $\Delta h$ , cm
+15.0	9.2	7.4	11.1
+14.5	9.6	7.6	11.5
+14.0	9.8	7.8	11.8
+13.0	10.2	8.2	12.2
+12.0	10.8	8.6	13.0
+11.0	11.2	9.2	13.6
+9.0	12.0	9.4	14.4
+6.0	13.0	10.0	15.6
+3.0	13.4	10.4	16.2
0.0	14.0	10.6	17.2
-3.0	13.8	10.0	16.8
-6.0	13.4	9.6	16.2
-9.0	12.4	9.4	15.2
-11.0	11.6	9.0	14.4
-12.0	11.2	9.8	13.8
-13.0	10.8	8.6	13.0
-14.0	10.4	8.2	12.4
-14.5	10.2	8.0	12.0
-15.0	10.0	7.8	11.6
FLUJO	1,375 g/seg	1,135 g/seg	1,525 g/seg
$N_{Re}$	57,000	50,250	61,750

## Tratamiento de los datos experimentales

### Experimentos con CMC y H<sub>2</sub>O

- a) Se calcularon las velocidades locales haciendo uso de la ecuación (v).
- b) Los diferentes números de Reynolds para la CMC se calcularon mediante la siguiente ecuación:

$$N_{Re'} = \frac{D^{n'} v^{2-n'} \rho}{\mu}$$

- c) Los números de Reynolds para el agua se calcularon mediante la ecuación siguiente:

$$N_{Re} = \frac{D v \rho}{\mu}$$

- d) En los Apéndices I y VI se muestra la forma en que se determinaron los valores de las constantes de la solución de Carboximetilcelulosa (C M C), los cuales se utilizaron para calcular los diferentes números de Reynolds de la misma.

TABLA 6.

v, cm/seg	Calibración con Agua		Calibración con CMC	
	$N_{Re}$		$v$ , cm/seg	$N_{Re}$
54.3	25,800		15.7	171
71.0	34,800		53.0	578
92.4	44,000		76.0	840
104.8	49,500		155.0	1,690
110.1	52,500		165.0	1,800
120.9	57,500		170.0	1,855
126.3	60,000		191.0	2,080
138.9	66,000		200.0	2,180
			270.0	2,920
			325.0	3,550
			390.0	4,250
			525.0	5,725

La viscosidad del agua a 32.0°C fué de 0.8 centipoises.

RESULTADOS

TABLA 7

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA SOLUCION ACUOSA DE CMC al 0.4% EN EL EXPERIMENTO 1.

$r/R$	$\sqrt{\Delta h}$ , $\text{cm}^{\frac{1}{2}}$	$v_z$ , $\text{cm/seg}$	$v_z/v_{z,\text{máx}}$
+0.787	1.64	63.9	0.690
+0.761	1.70	66.2	0.715
+0.735	1.76	68.4	0.738
+0.682	1.82	70.6	0.761
+0.630	1.87	72.6	0.784
+0.577	2.07	80.6	0.870
+0.472	2.17	84.2	0.908
+0.315	2.30	89.5	0.966
+0.157	2.34	91.1	0.983
0.000	2.39	92.6	1.000
-0.157	2.30	89.5	0.966
-0.315	2.26	87.7	0.947
-0.472	2.17	84.2	0.908
-0.577	2.12	82.0	0.885
-0.630	2.07	80.6	0.870
-0.682	2.02	78.6	0.849
-0.735	1.99	77.1	0.830
-0.761	1.92	74.7	0.810
-0.787	1.87	72.7	0.784

$$N_{Re} = 3,520$$

TABLA 8

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA SOLUCION ACUOSA DE CMC AL  
0.4 % EN EL EXPERIMENTO 2.

$r/R$	$\sqrt{\Delta h}, \text{ cm}^{\frac{1}{2}}$	$v_z, \text{ cm/seg}$	$v_z/v_{z,\text{máx}}$
+0.787	2.47	83.6	0.829
+0.761	2.52	85.3	0.845
+0.735	2.57	87.0	0.862
+0.682	2.63	89.0	0.882
+0.630	2.67	90.4	0.896
+0.577	2.78	94.0	0.932
+0.472	2.85	96.5	0.956
+0.315	2.92	98.8	0.979
+0.157	2.95	99.8	0.989
0.000	2.98	100.9	1.000
-0.157	2.95	99.8	0.989
-0.315	2.88	97.5	0.966
-0.472	2.74	92.7	0.919
-0.577	2.65	89.7	0.889
-0.630	2.57	87.0	0.862
-0.682	2.49	84.3	0.835
-0.735	2.45	82.9	0.822
-0.761	2.41	81.6	0.810
-0.787	2.33	78.9	0.782

$$N_{Re'} = 4,100$$

TABLA 9

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA SOLUCION ACUOSA DE CMC  
AL 0.4% EN EL EXPERIMENTO 3

$r/R$	$\sqrt{\Delta h}$ , $\text{cm}^{\frac{1}{2}}$	$v_z$ , $\text{cm/seg}$	$v_z/v_{z,\text{máx}}$
+0.787	3.12	105.4	0.823
+0.761	3.22	108.8	0.849
+0.735	3.28	110.8	0.864
+0.682	3.34	112.9	0.880
+0.630	3.42	115.9	0.904
+0.577	3.48	117.8	0.918
+0.472	3.57	120.8	0.941
+0.315	3.68	124.4	0.970
+0.157	3.71	125.5	0.978
0.000	3.79	128.2	1.000
-0.157	3.71	125.5	0.978
-0.315	3.60	121.6	0.948
-0.472	3.47	117.1	0.914
-0.577	3.33	112.3	0.876
-0.630	3.28	110.8	0.864
-0.682	3.24	109.8	0.855
-0.735	3.12	105.4	0.824
-0.761	3.09	104.5	0.814
-0.787	3.02	104.1	0.812

$$N_{Re} = 5,000$$

TABLA 10

RESULTADOS OBTENIDOS CON AGUA EN EL EXPERIMENTO 1.

$r/R$	$\sqrt{\Delta h}, \text{ cm}^{\frac{1}{2}}$	$v_z, \text{ cm/seg}$	$v_z/v_{z,\text{máx}}$
+0.787	3.04	102.9	0.813
+0.761	3.12	105.6	0.834
+0.735	3.14	106.3	0.840
+0.682	3.20	108.3	0.855
+0.630	3.29	111.4	0.880
+0.577	3.35	113.4	0.895
+0.472	3.46	117.1	0.925
+0.315	3.61	122.2	0.965
+0.157	3.66	123.9	0.979
0.000	3.74	126.6	1.000
-0.157	3.82	125.9	0.994
-0.315	3.66	123.9	0.979
-0.472	3.52	119.2	0.942
-0.577	3.41	115.4	0.912
-0.630	3.35	113.4	0.895
-0.682	3.29	111.4	0.880
-0.735	3.22	109.0	0.861
-0.761	3.20	108.3	0.855
-0.787	3.16	107.0	0.845

$$N_{Re} = 57,000$$

TABLA 11

RESULTADOS OBTENIDOS CON AGUA EN EL EXPERIMENTO 2.

$r/R$	$\sqrt{\Delta h}, \text{ cm}^{\frac{1}{2}}$	$v_z, \text{ cm/seg}$	$v_z/v_{z,\text{máx}}$
+0.787	2.72	92.1	0.834
+0.761	2.76	93.4	0.846
+0.735	2.80	94.8	0.859
+0.682	2.86	96.8	0.877
+0.630	2.94	99.5	0.901
+0.577	3.04	102.9	0.932
+0.472	3.07	103.9	0.941
+0.315	3.16	107.0	0.969
+0.157	3.22	109.0	0.987
0.000	3.26	110.4	1.000
-0.157	3.16	107.0	0.969
-0.315	3.10	104.9	0.950
-0.472	3.07	103.9	0.941
-0.577	3.00	101.6	0.920
-0.630	2.97	100.5	0.910
-0.682	2.94	99.5	0.901
-0.735	2.86	96.8	0.877
-0.761	2.83	95.8	0.868
-0.787	2.80	94.8	0.859

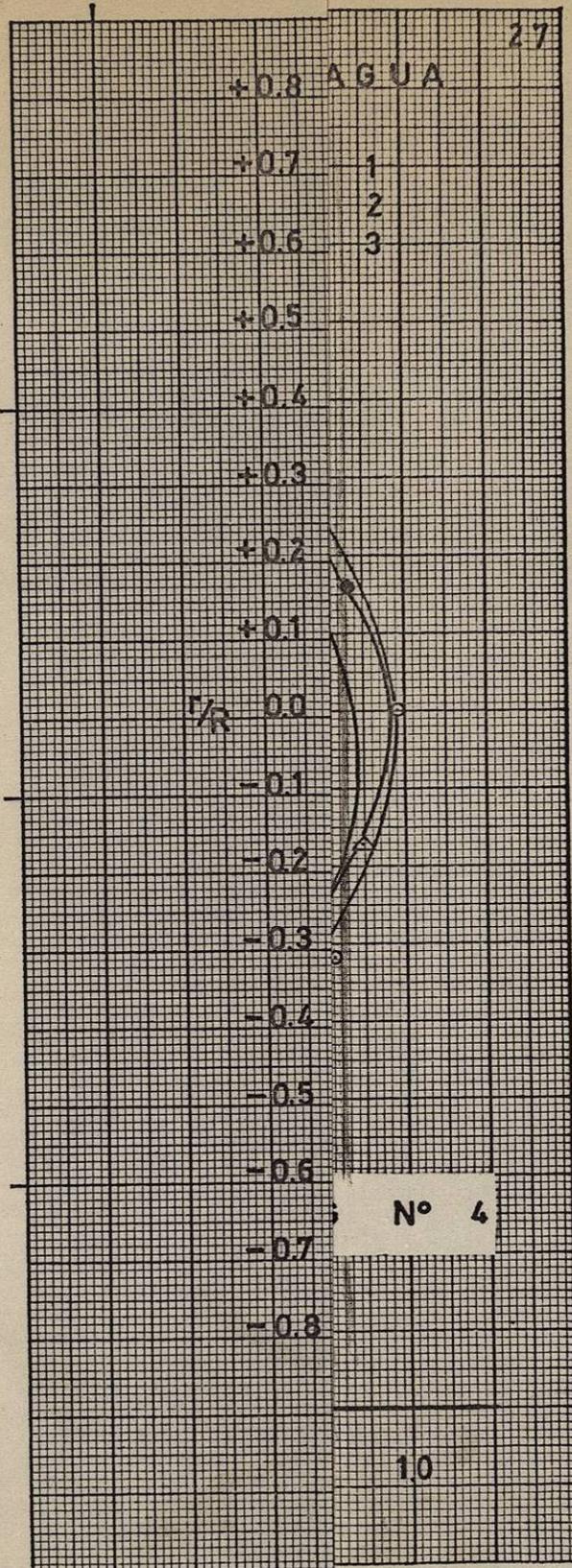
$$N_{Re} = 50,250$$

TABLA 12

RESULTADOS OBTENIDOS CON AGUA EN EL EXPERIMENTO 3.

$r/R$	$\sqrt{\Delta h}, \text{ cm}^{\frac{1}{2}}$	$v_z, \text{ cm/seg}$	$v_z/v_{z,\text{máx}}$
+0.77	3.34	113.1	0.805
+0.761	3.38	114.4	0.814
+0.735	3.44	116.4	0.828
+0.682	3.50	118.5	0.843
+0.630	3.61	122.2	0.870
+0.577	3.69	124.9	0.890
+0.472	3.80	128.6	0.915
+0.315	3.95	133.7	0.951
+0.157	4.03	136.4	0.971
0.000	4.15	140.5	1.000
-0.157	4.10	138.8	0.988
-0.315	4.03	136.4	0.971
-0.472	3.90	132.0	0.940
-0.577	3.80	128.6	0.915
-0.630	3.72	125.9	0.896
-0.682	3.61	122.2	0.870
-0.735	3.52	119.2	0.848
-0.761	3.46	117.1	0.833
-0.787	3.41	115.4	0.821

$$N_{Re} = 61,750$$



\* 67912

vando sobre las ordenadas las relaciones  $r/R$  y sobre las

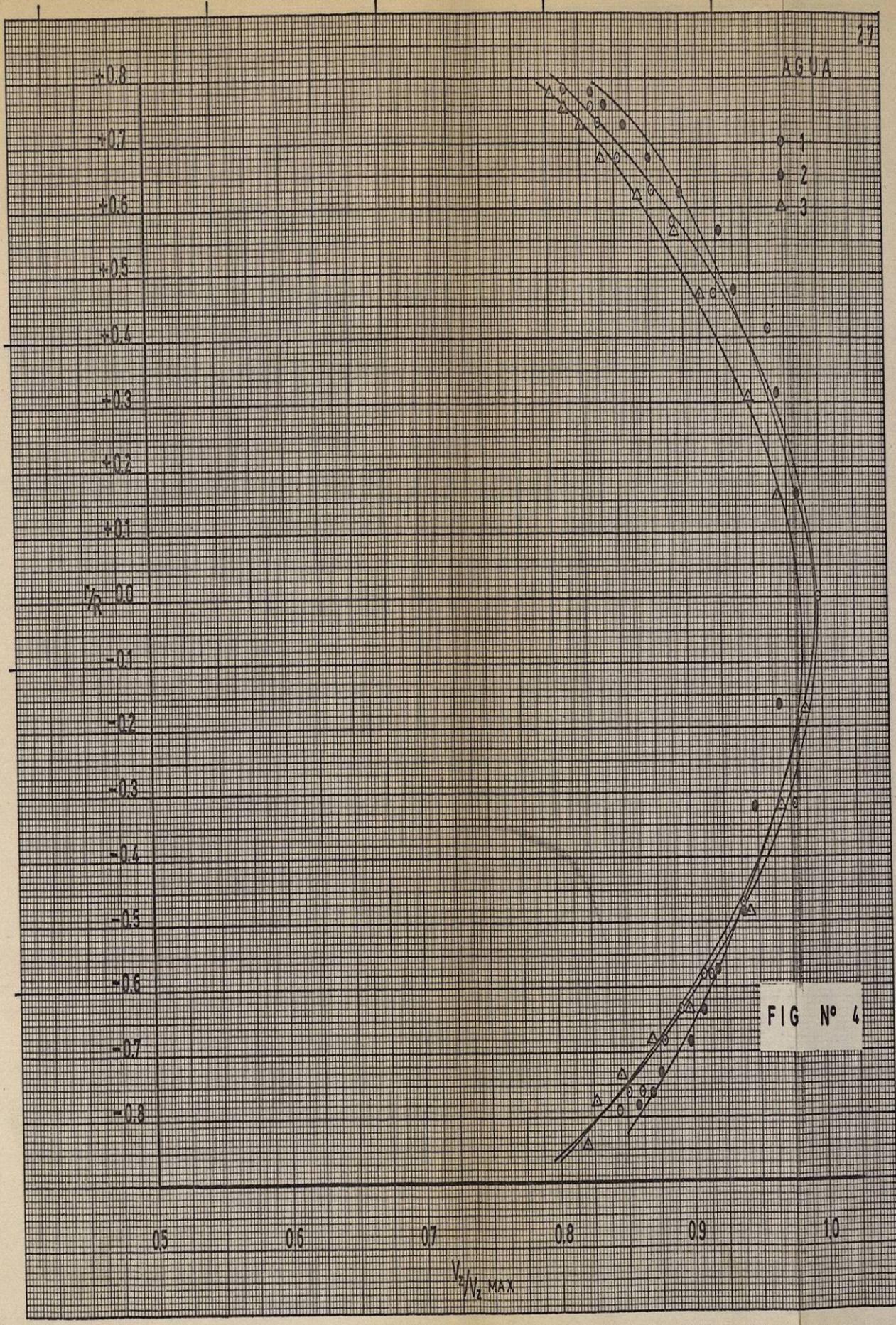
AGUA

+0.8  
+0.7  
+0.6  
+0.5  
+0.4  
+0.3  
+0.2  
+0.1  
0.0  
-0.1  
-0.2  
-0.3  
-0.4  
-0.5  
-0.6  
-0.7  
-0.8

05 06 07 08 09 10

$V_z/V_z \text{ MAX}$

FIG N° 4



AGUA

- 1
- 2
- △ 3

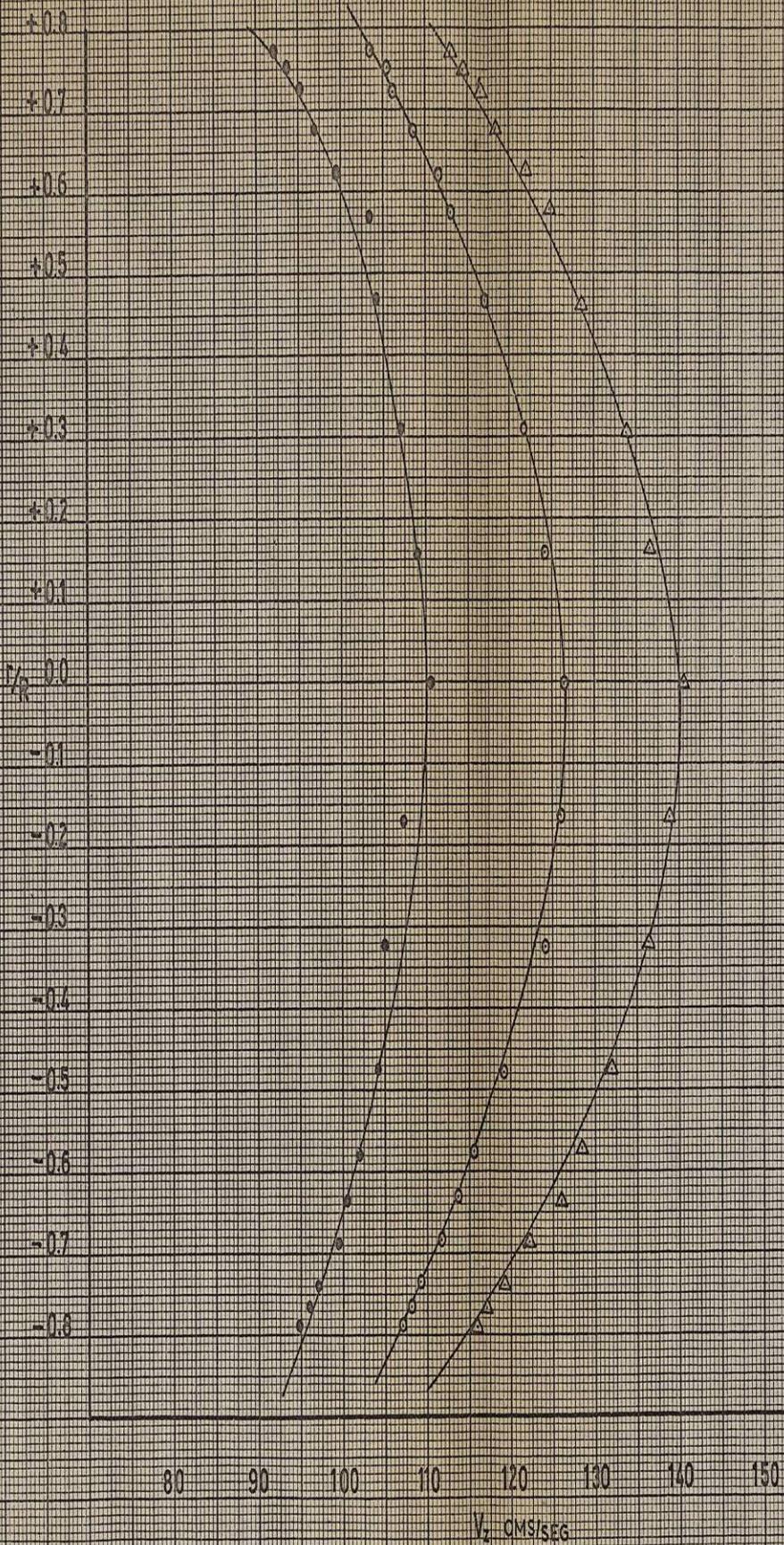


FIG N° 5

C.M.C.

$N_{R_2} = 3570$

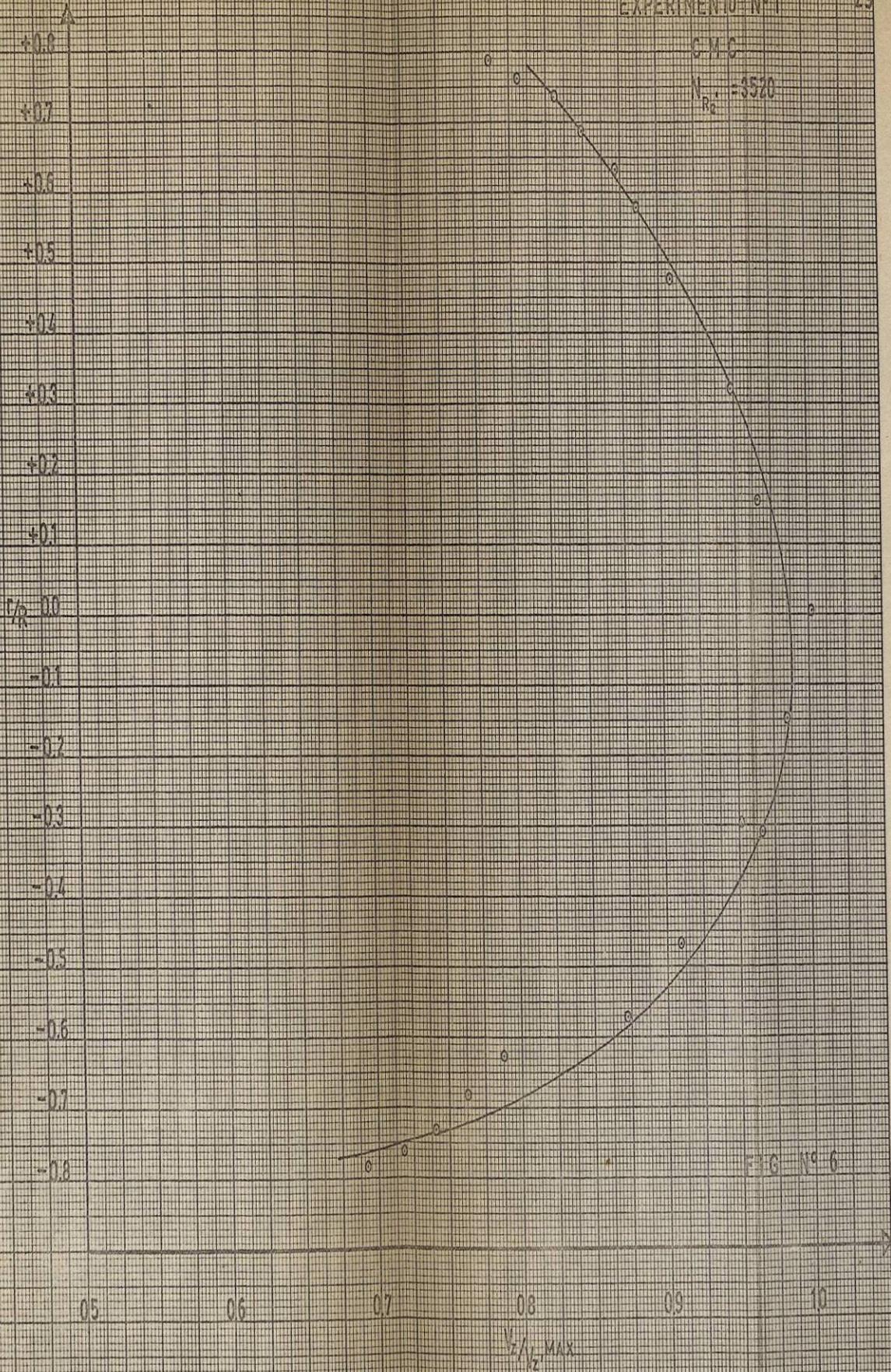


FIG Nº 6

EXPERIMENTO N° 2

C.M.C.

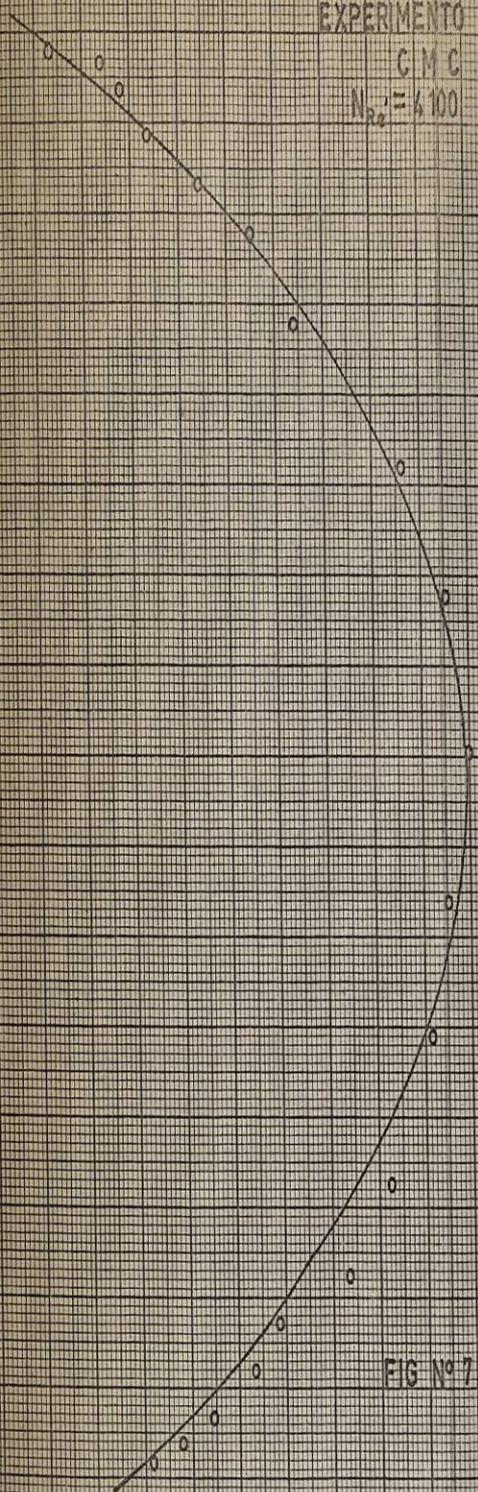
$N_{ax} = 4100$

+0.8  
+0.7  
+0.6  
+0.5  
+0.4  
+0.3  
+0.2  
+0.1  
0.0  
-0.1  
-0.2  
-0.3  
-0.4  
-0.5  
-0.6  
-0.7  
-0.8

05 06 07 08 09 10

$V_2/V_2 \text{ MAX}$

FIG N° 7



EXPERIMENTO N° 3

C.M.C

$N_{Re} = 5000$

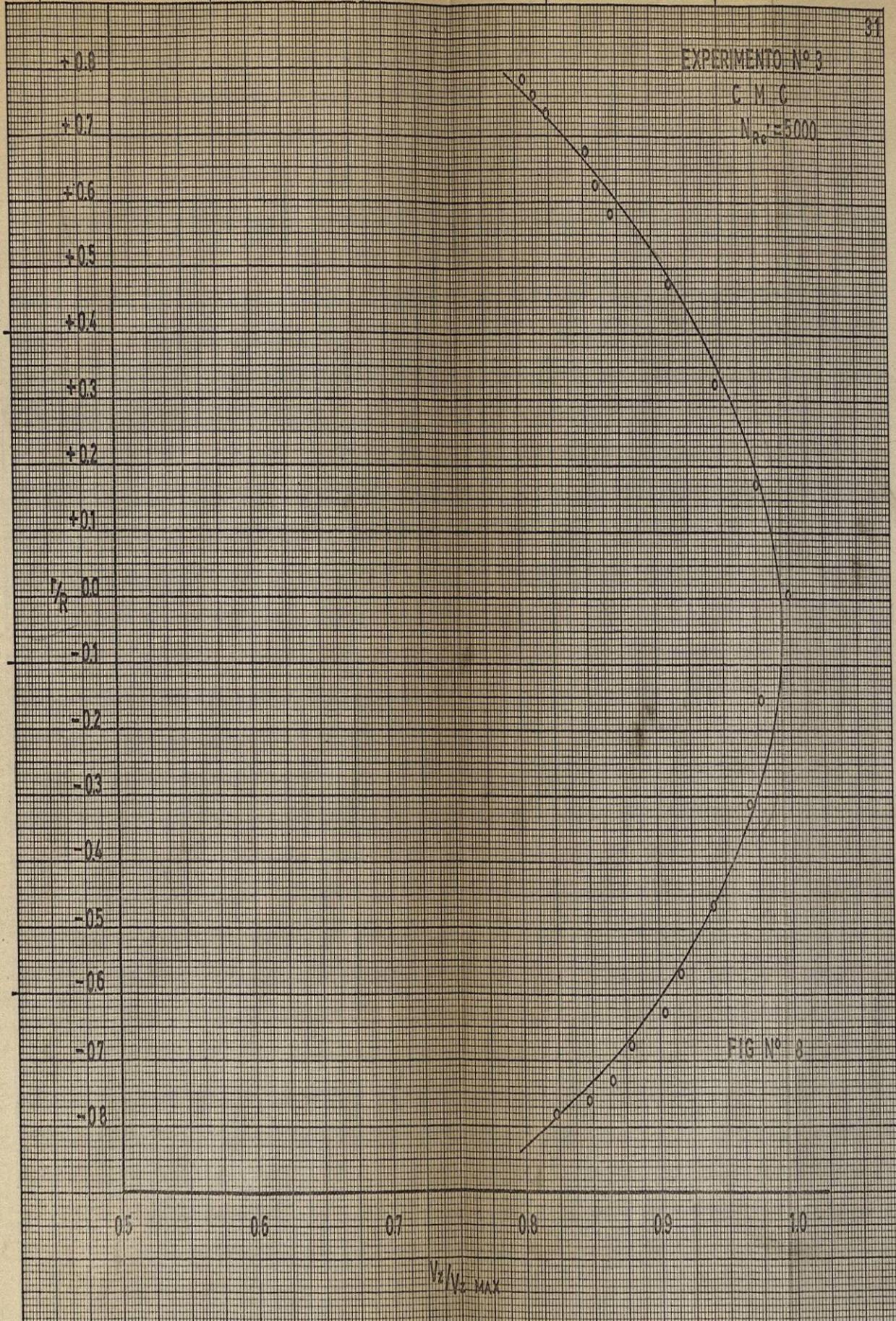
+0.8  
+0.7  
+0.6  
+0.5  
+0.4  
+0.3  
+0.2  
+0.1  
0.0  
-0.1  
-0.2  
-0.3  
-0.4  
-0.5  
-0.6  
-0.7  
-0.8

$\frac{V_z}{R}$

0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

$\frac{V_z}{V_{z\text{MAX}}}$

FIG N° 8



+0.8  
+0.7  
+0.6  
+0.5  
+0.4  
+0.3  
+0.2  
+0.1  
0.0  
-0.1  
-0.2  
-0.3  
-0.4  
-0.5  
-0.6  
-0.7  
-0.8

- 1
- 2
- △ 3

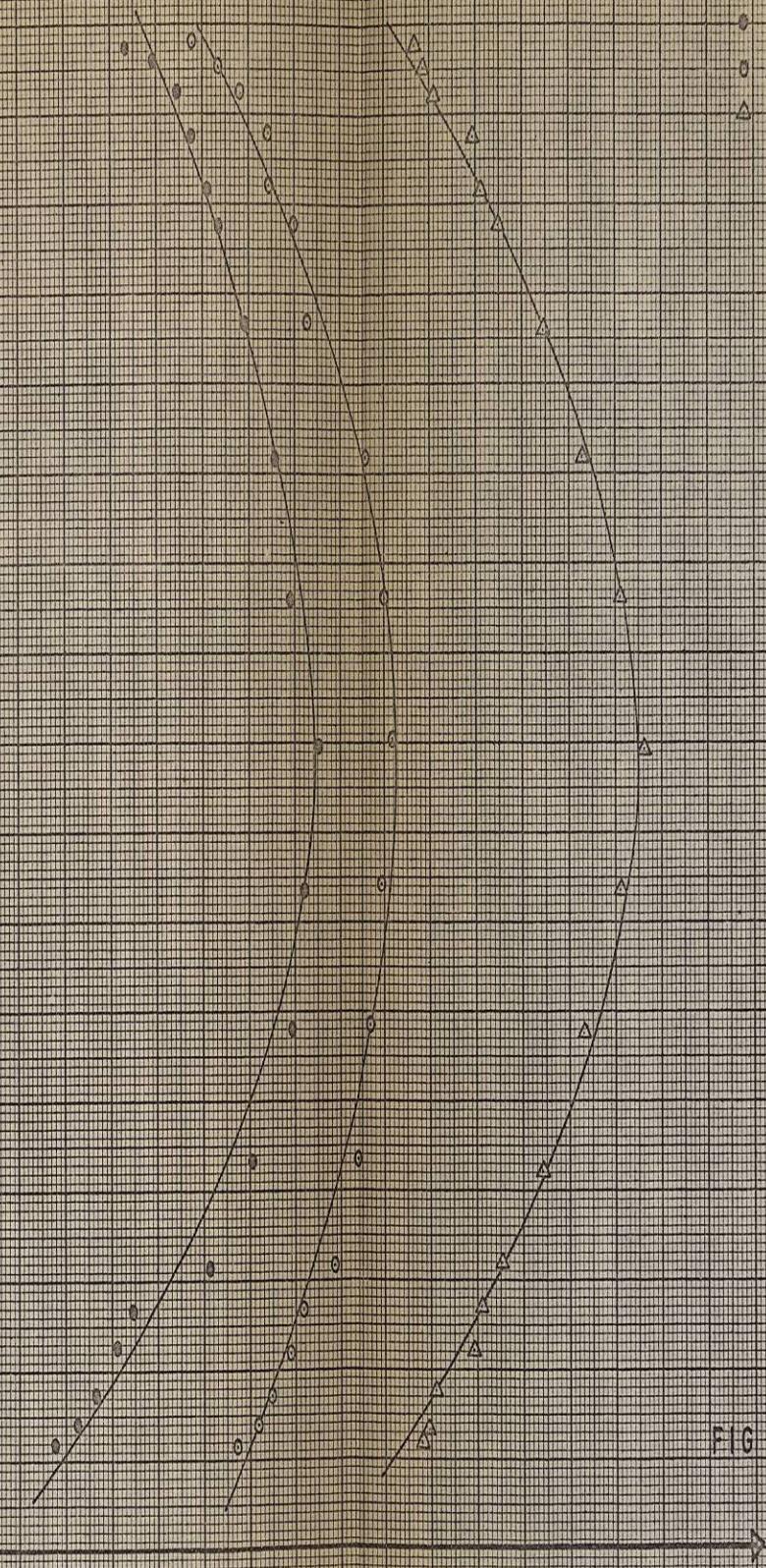


FIG N° 9

60 70 80 90 100 110 120 130

$V_2$

## DISCUSION, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La naturaleza tan compleja del flujo turbulento y de los flúidos no-Newtonianos han hecho que diferentes investigadores se hayan dedicado a su estudio a objeto de poder establecer ciertas relaciones matemáticas o modelos empíricos que puedan indicar el comportamiento de estos flúidos fluyendo en tuberías y bajo condiciones -- turbulentas.

En este trabajo se trató de hacer un intento - de estudio del comportamiento de flúidos no-Newtonianos, habiéndose preparado dicho flúido con Carboximetilcelulosa al 0.4 % en solución acuosa.

Con el objeto de determinar las variables que intervienen o que definen el flujo turbulento de los flúidos no-Newtonianos se diseñó, construyó y operó un sistema que proporcionó los datos necesarios que definieron - el comportamiento del flúido en cuestión.

Haciendo un análisis de los resultados obtenidos, podemos observar para el efecto las Figs. 6, 7 y 8 en donde se graficaron los perfiles de velocidad o distribuciones de velocidad del flúido no-Newtoniano, llevando sobre las ordenadas las relaciones  $r/R$  y sobre las

abscisas las velocidades reducidas para cada número de Reynolds que se investigó; se puede notar que las determinaciones de las velocidades dan puntos más alineados en la parte superior del tubo que en la parte inferior y que el perfil de velocidad no es simétrico, como en el agua. Esto se puede deber a que, aún con la distancia del tubo antes del medidor Pitot de 60 diámetros y todavía con un enderezador de flujo antes de ese tramo de tubo, no se logró que hubiera un flujo bien desarrollado, es decir que presentara un perfil simétrico de la parte superior con la inferior.

Ahora bien, a objeto de comparar el comportamiento del fluido no-Newtoniano a diferentes números de Reynolds generalizados, se graficaron las mismas coordenadas en gráficas por separado debido a que se presentaban muchos empalmes y era difícil establecer conclusiones precisas. Es notorio el hecho de que aún a diferentes Reynolds las gráficas no presentan mayor diferencia entre una y otra pero esto se debió a que los Reynolds están relativamente próximos. Sin embargo, los perfiles de velocidad hallados experimentalmente son comparables con los reportados en la literatura (2) lo que hace concluir que tanto el aparato diseñado, construido y opera-

do en las condiciones de este trabajo, si cumple con las características de un sistema en escala experimental de laboratorio de donde se puede obtener valiosa información posterior para estudios más profundos, que permitan establecer relaciones más precisas para los flúidos no-Newtonianos.

A objeto de establecer comparaciones entre el comportamiento de los flúidos no-Newtonianos y los Newtonianos se hicieron experimentos con agua (Newtoniano) y se graficaron los valores necesarios para obtener los -- perfiles de distribución de velocidades para números de Reynolds en régimen altamente turbulento. Los perfiles de las distribuciones de velocidades se pueden observar en las Figs. 4 y 5. En la Fig. 4 se graficaron las relaciones  $r/R$  vs. velocidades instantáneas locales y en la Fig. 5 se graficaron las relaciones  $r/R$  vs. las velocidades reducidas a objeto de establecer comparaciones con las gráficas de la CMC.

En la operación del sistema se presentaron una serie de contratiempos que obstaculizaron la toma de lecturas. La mayoría fueron solucionados, pero a continuación se dan las siguientes recomendaciones para mejorar el diseño y facilitar la operación del aparato:

- 1.- El tubo de impacto (Pitot) debe ser coloca

do de tal manera que permita obtener datos de las distancias radiales más cerca de las paredes del tubo. En este trabajo no se logró esto último en vista de que el tubo de impacto estaba unido a la toma de presión dinámica por medio de soldadura y esta impedía que llegara hasta las paredes. La recomendación que se hace es adaptar un tubo de impacto más largo a objeto de que la unión entre este y la toma de presión dinámica quede fuera de la sección de prueba y de esta manera se puedan hacer mediciones en las cercanías de  $r/R = 1.0$ .

- 2.- No deben hacerse lecturas de los  $\Delta h$  sin antes asegurarse de dejar el tiempo suficiente para que las lecturas en el manómetro sean estables.
- 3.- Se sugiere que la primera medida se tome a la mayor velocidad de flujo que se pueda lograr y que las subsecuentes mediciones se hagan a velocidades de flujo correspondientes a  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$ , etc. del flujo máximo.

4.- Se debe observar para otros flúidos no-Newtonianos si el perfil de velocidades es si métrico. En caso de que no lo fuere se su giere aumentar la longitud del tubo antes de la sección de prueba.

En general el sistema presentado en este trabajo cumple con los requisitos necesarios para podersele considerar aceptable, pero es necesario operar con otros flúidos no-Newtonianos y bajo otras condiciones de operación a objeto de poder dar un fallo definitivo de su - - efectividad.

Como ya se citó, este trabajo no fué más que - un intento de estudio de los flúidos no-Newtonianos y no pretende ser algo definitivo, pues solo se trató de lo-- grar un sistema capaz de dar información necesaria acerca del comportamiento de este tipo especial de flúidos: Flúidos no-Newtonianos.

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- CROSBY, E.J., "Experiments in Transport Phenomena", Department of Chemical Engineering. The University of Wisconsin. John Wiley & Sons, New York, 1961
- 2.- BIRD, R.B. y Otros, "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, Inc. New York, 1964.
- 3.- PERRY, J.H., "Chemical Engineer's Handbook", International Student Edition, Mc Graw-Hill Book Co., Kogakusha Col, Ltd., Tokyo, Japón, 1963.
- 4.- LOPEZ R., H.M. Ch. E. Thesis, University of Delaware. Newark, Del. 1959.
- 5.- MORALES M., H., "Agitación de Flúidos no-Newtonianos", Tesis Profesional, I.T.E.S.M. 1962.

## APENDICE I

Ejemplificación del procedimiento seguido y de los cálculos para la determinación de las constantes  $n'$  y  $K$  de la solución acuosa de CMC al 0.4%:

- 1.- Previamente se determinó el diámetro interno del tubo capilar usando un aceite de -- viscosidad conocida: Aceite N de la National Bureau of Standards.
- 2.- Se instaló el viscosímetro de capilar. El viscosímetro de capilar consistió de una - cámara donde se introdujeron los flúidos. Esta cámara está conectada por su parte - inferior con un tubo capilar y en la parte superior a una línea de aire comprimido. - En la línea de aire comprimido se tenía un manómetro de laboratorio con una escala de 0.1 a 14.0 Kg/cm<sup>2</sup> con divisiones de 0.05 - Kg/cm<sup>2</sup>.
- a)- Se colocó el aceite N en la cámara - del viscosímetro, se selló y se le aplicó una presión determinada proporcional

da por aire comprimido.

b)- Se recibió el fluido que pasó en 30 -- seg y se pesó en un vaso de precipitados de 250 ml de capacidad.

c)- Los datos obtenidos fueron los siguientes:

$\Delta P$ , Kg/cm <sup>2</sup>	w' aceite, g	w aceite, g/seg
1.8	0.75	$2.5 \times 10^{-2}$
3.0	0.87	$2.9 \times 10^{-2}$
3.95	1.15	$3.8 \times 10^{-2}$

Los datos para el aceite estándar fueron tratados a objeto de determinar el diámetro del capilar, en la siguiente forma:

$$3.95 \text{ Kg/cm}^2 = 3.875 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2$$

Se calculó la presión ejercida por el peso de la columna de líquido por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \rho g h, \quad h = 68.0 \text{ cm}$$

Esta presión resultó ser de  $0.0546 \times 10^6$  dinas/cm<sup>2</sup>, que sumada a la presión soportada por el aceite en la cámara, da una presión total de  $3.93 \times 10^6$  dinas/cm<sup>2</sup>.

El diámetro interno del capilar se calculó aplicando la ecuación de Poiseuille:

$$D_c^4 = \frac{128 \mu L}{\pi \rho} \frac{w}{(\Delta P_t)}$$

$$\text{Factor } \frac{128 \mu L}{\pi \rho} = 24,500$$

El factor anterior se multiplicó por la relación  $w/(\Delta P_t)$ , así:

$$D_c^4 = 24,500 \times \frac{w}{(\Delta P_t)} = 2.39 \text{ cm}^4$$

$$D_c = 1.243 \text{ mm.}$$

Una vez que se tenía el  $D_c$  se procedió a determinar los valores de  $n'$  y de  $K$  para la solución acuosa de CMC al 0.4 % de la siguiente manera:

a)- Se tomaron las siguientes mediciones del viscosímetro de capilar:

$\Delta P$ , dinas/cm <sup>2</sup>	w, g/seg
1- 0.196 X 10 <sup>6</sup>	0.396
2- 0.392 X 10 <sup>6</sup>	0.998
3- 0.589 X 10 <sup>6</sup>	1.300
4- 0.785 X 10 <sup>6</sup>	1.780

La presión ejercida por la columna de CMC en el capilar fué de  $0.054 \times 10^6$  dinas/cm<sup>2</sup>.

El valor de  $n'$  se determinó graficando

$$\frac{\Delta P_t D_c}{4L} \text{ vs. } \frac{8v}{D_c} \text{ en papel log-log}$$

(Ver Apéndice VI)  $n' = 0.782$

$$\text{Los valores de } -(dv_z/dr) = \frac{3n' + 1}{4n'} \frac{8v}{D_c}$$

Introduciendo el valor de  $n'$  en la ecuación -- para la determinación de  $K$ , se encontró que su valor fué de:

$$\frac{\Delta P_t D_c}{4L} = K \left( \frac{dv_z}{dr} \right)^{n'}$$

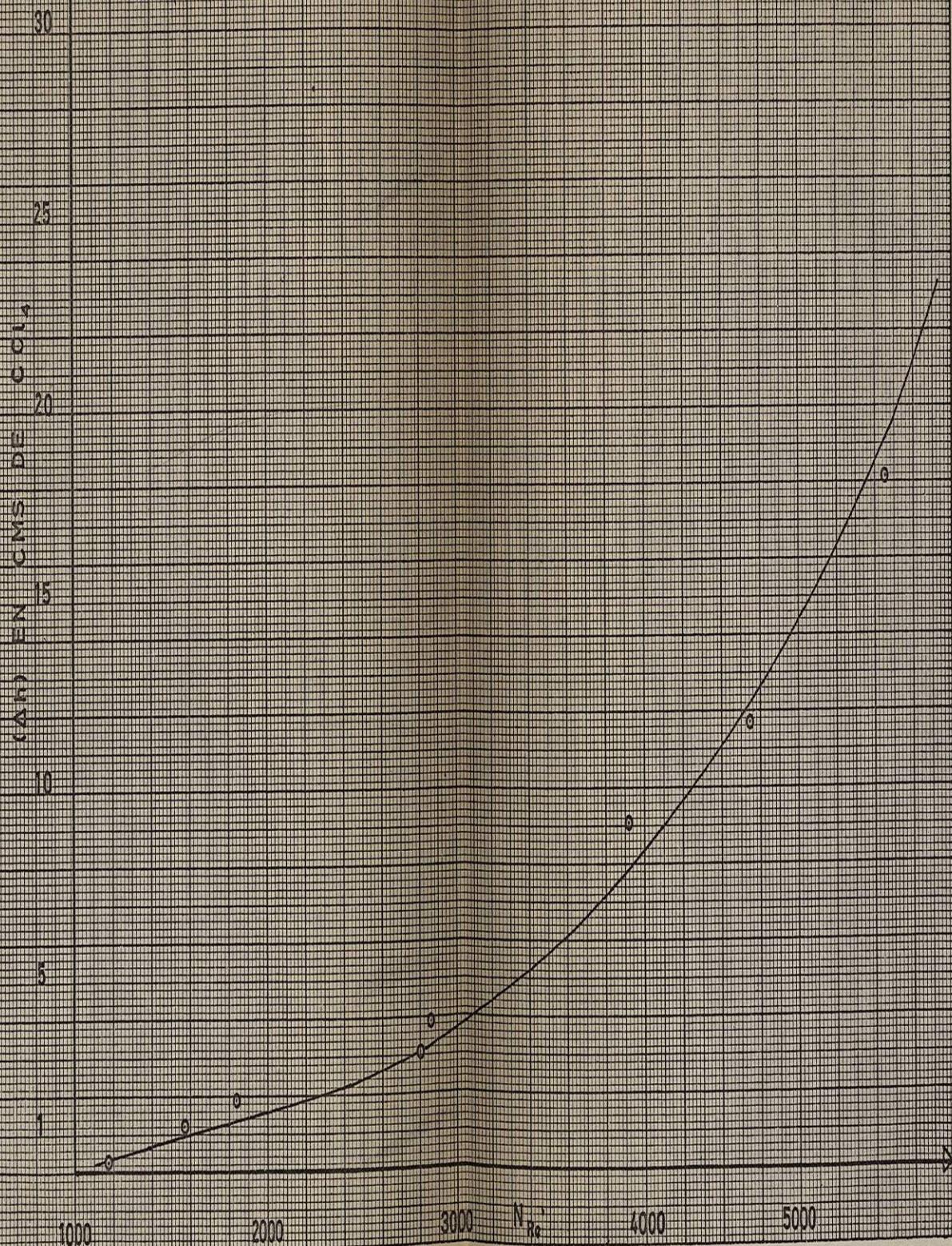
$$K = 0.411$$

Los resultados obtenidos se dan en la TABLA A.

TABLA A

$\Delta P_t$ , dinas/cm <sup>2</sup>	$8v/D_c = 6,005 w$	$\frac{(\Delta P_t) D_c}{4L}$	$-(dv_z/dr)$
1- $0.25 \times 10^6$	2,370	133.2	2,535
2- $0.45 \times 10^6$	5,190	238.0	5,560
3- $0.64 \times 10^6$	7,800	342.5	8,350
4- $0.84 \times 10^6$	11,095	447.0	11,890

APENDICE IV  
CURVA DE CALIBRACION DEL PITOT  
CON C.M.C.



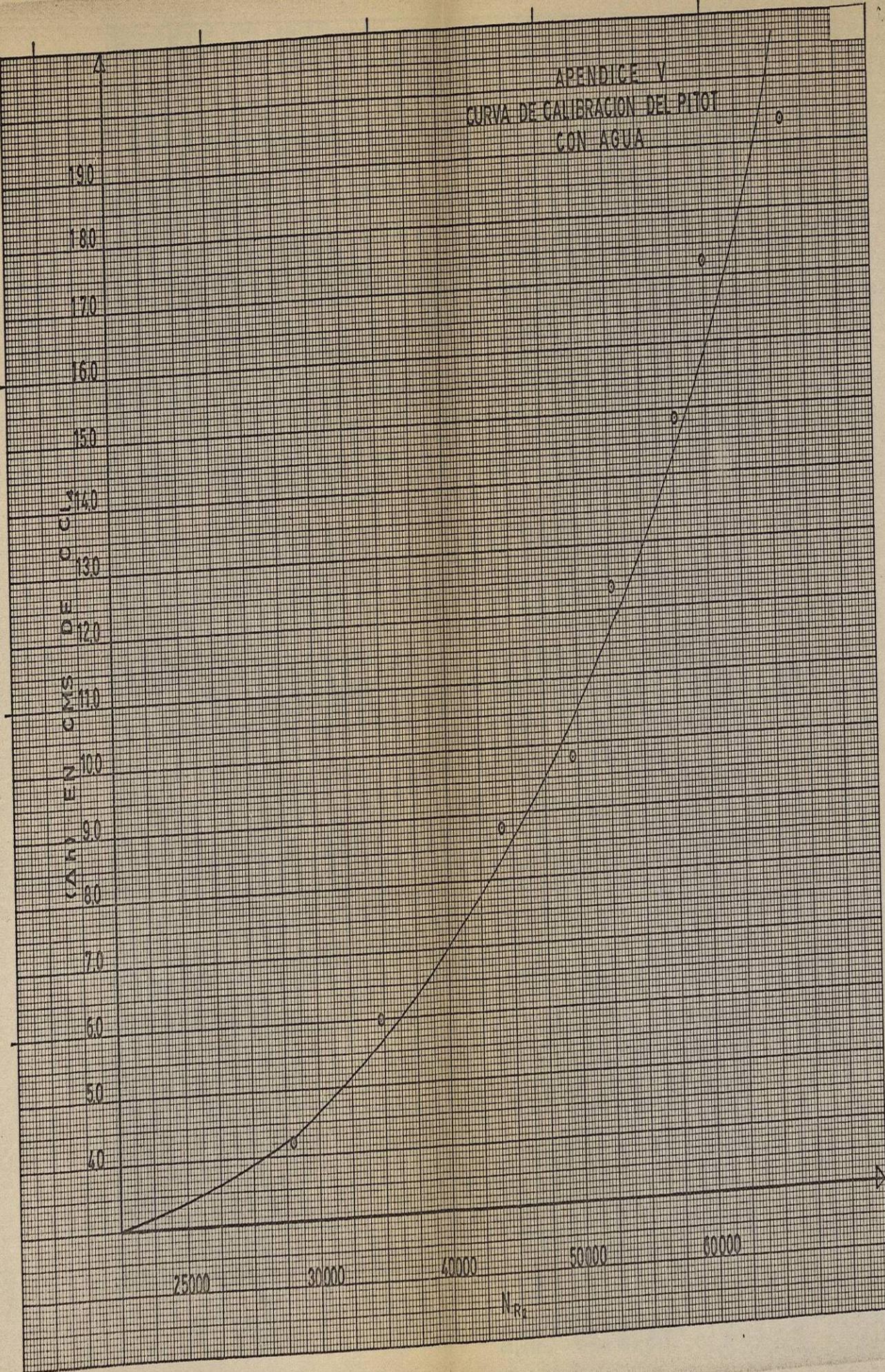
APENDICE V  
CURVA DE CALIBRACION DEL PITOT  
CON AGUA

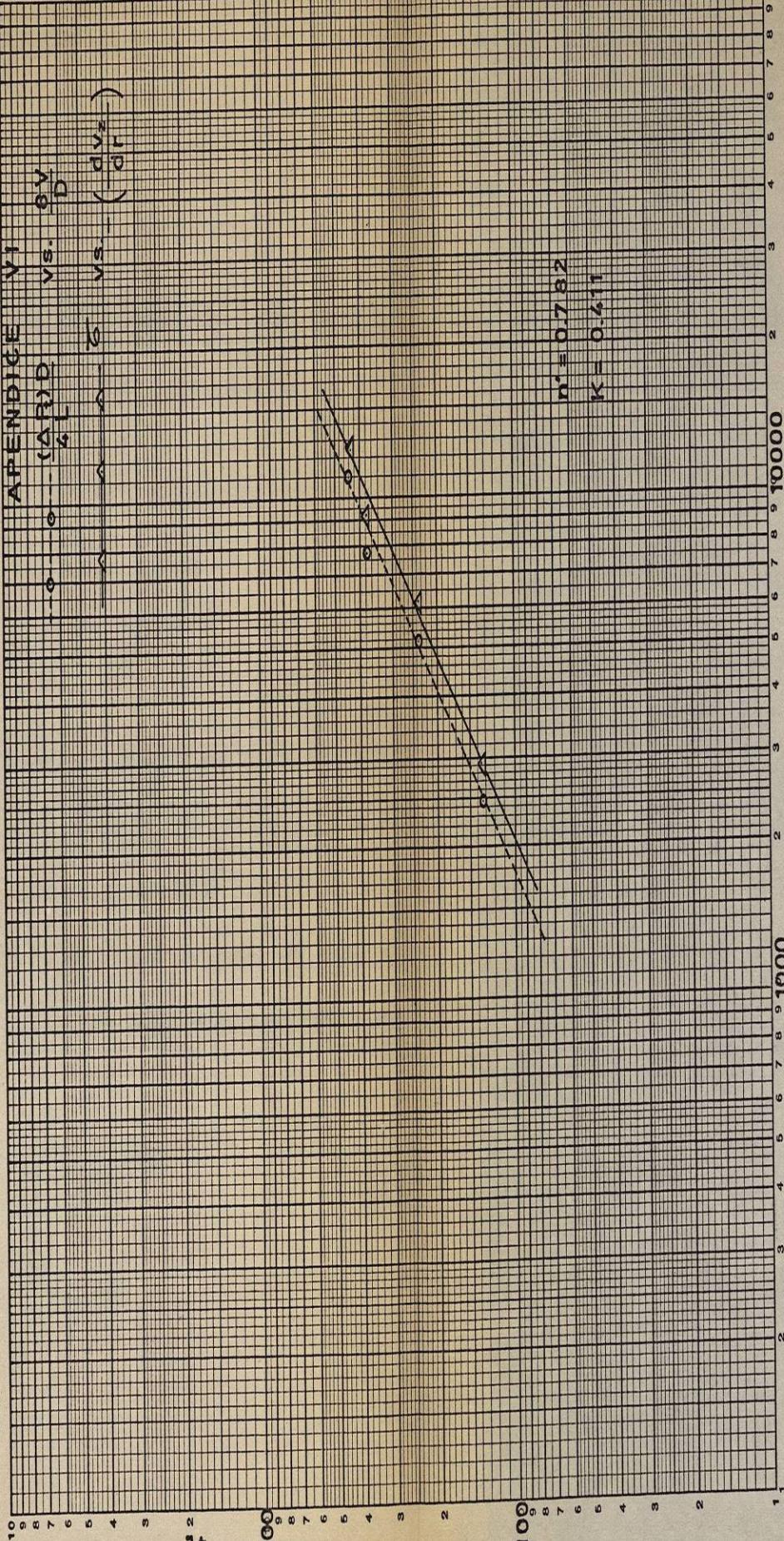
190  
180  
170  
160  
150  
140  
130  
120  
110  
100  
90  
80  
70  
60  
50  
40

25000 30000 40000 50000 60000

$N_{Re}$

CA  
M  
E





$n' = 0.782$   
 $K = 0.411$

$\frac{8V}{D} \quad , \quad - \left( \frac{dv_z}{dr} \right)$

$(AR)D$ , 6

K&E LOGARITHMIC 359-120  
 KEUFFEL & ESSER CO. MADE IN U.S.A.  
 3 X 3 CYCLES

## APENDICE II

Ejemplificación del cálculo del número de Reynolds generalizado para el fluido no-Newtoniano.

Se utilizó la siguiente ecuación:

$$N_{Re} = \frac{D^{n'} v^{2-n'} \rho}{\tau} \quad (3)$$

El cálculo de  $n'$  y de  $K$  ejemplificado en el Apéndice anterior (I) se justifica, pues con estos valores se tiene que calcular el valor de  $\tau$  para poder determinar los números de Reynolds generalizados. El valor de  $\tau$  obtenido se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$\tau = K \times 8^{n'-1} \quad (3)$$

$$\tau = 0.261$$

### APENDICE III

Ejemplificación de la forma en que se calcularon las velocidades locales:

Se utilizó la ecuación (v)

$$v_z = [2 g \rho_f \Delta h]^{\frac{1}{2}}$$

$$\rho_f = \frac{1.585 - 1.001}{1.001}$$

$$v_z = [2 \times 981 \rho_f \Delta h]^{\frac{1}{2}}$$

$$v_z = 33.85 \sqrt{\Delta h}$$

## FECHA DE DEVOLUCION

Este libro deberá ser devuelto dentro de un término que expira en la fecha marcada por el último sello; de no ser así, el lector se obliga a pagar las multas que marcan los Reglamentos.

--	--	--	--



