

Tesis de Posgrado

Un dispositivo para la medición de altas viscosidades : aplicación al estudio de materiales asfálticos

Hita, Pedro S.

1944

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Química de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Hita, Pedro S.. (1944). Un dispositivo para la medición de altas viscosidades : aplicación al estudio de materiales asfálticos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_0364_Hita.pdf

Cita tipo Chicago:

Hita, Pedro S.. "Un dispositivo para la medición de altas viscosidades : aplicación al estudio de materiales asfálticos". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1944. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_0364_Hita.pdf

EXACTAS UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



UBA

Universidad de Buenos Aires

UN DISPOSITIVO PARA LA MEDICION DE ALTAS VISCOSIDADES

Aplicación al estudio de materiales asfálticos

T E S I S

PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EN QUIMICA

PEDRO S. HITA

Tesis: 364

UNIVERSIDAD NACIONAL DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES

1944.

INTRODUCCION

En el estudio de la estructura de la materia y en especial de los líquidos, desempeña un papel muy importante las llamadas propiedades reológicas, comprendiéndose bajo la denominación de reología el estudio de la viscosidad, en relación con la presión y temperatura, la elasticidad, las viscosidades anómalas, la variación de la viscosidad por agitación mecánica (tixotropía) etc. Por ejemplo Staudinger ha establecido relaciones muy importantes entre las magnitudes moleculares de sustancias de alto peso molecular y la viscosidad y ha ideado métodos para seguir el proceso de polimerización de resinas sintéticas (1). Andrade ha ideado una teoría de los líquidos en las proximidades del punto de fusión a partir de la función empírica de la variación de la viscosidad con la temperatura (2); diversos autores han establecido la existencia de una estructura reticular en ciertas soluciones coloidales por el estudio de viscosidades anómalas y tixotropía; es en el estudio de los coloides donde mayor información se ha obtenido por mediciones de viscosidad.

Si bien en las aplicaciones de la técnica se han utilizado a menudo las propiedades reológicas para definir los materiales, controlar procesos de fabricación, etc. no se ha podido aprovechar convenientemente el abundante material experimental que la ciencia ha aportado, porque los métodos de la técnica son generalmente de un carácter empírico tal, que rara vez está bien definida la magnitud que se pretende "medir".

La "consistencia" de asfaltos, resinas, pinturas, morteros; el "punto de ablandamiento" de materiales plásticos; la "ductilidad" de los asfaltos; el "fraguado" del mortero y del hormigón; los "límites lí-

quidos y plásticos" y el "índice de plasticidad" de las arcillas, son ejemplos de datos obtenidos por métodos empíricos sin fundamento científico.

En el presente trabajo hemos estudiado un dispositivo para medir viscosidades de materiales de muy alta viscosidad: 10^5 a 10^7 unidades absolutas (poises) o sea hasta mil millones de veces la viscosidad del agua (0,01 poise). Basado en el método de escurrimiento de líquidos en tubos capilares, lo hemos aplicado al estudio de cementos asfálticos.

Antes de detallar el método propuesto por nosotros, haremos una enumeración de los que se utilizan con frecuencia.

I-VISCOSIDAD

En el movimiento de fluidos reales existen fuerzas que se oponen al movimiento y son debidas al frotamiento interior o viscosidad del fluido.

Sean dos capas del fluido separadas por una distancia normal a la dirección del movimiento ΔC y que se mueven con una diferencia de velocidad Δv ; se denomina "gradiente de velocidad" en la dirección considerada, al límite del cociente $\frac{\Delta v}{\Delta C}$ cuando ΔC tiende a cero, o sea la derivada:

$$\text{gradiente: } \frac{dv}{dC} \quad (\text{form. 1})$$

Para los líquidos comunes, agua alcohol, etc. se ha encontrado experimentalmente que la fuerza que es necesario vencer para mantener el movimiento estacionario, es proporcional al gradiente de velocidad y al área de las superficies en contacto, o sea:

$$F_v = \eta A \frac{dv}{dC} \quad (\text{form. 2})$$

El coeficiente de proporcionalidad η se denomina coeficiente de frotamiento interno o viscosidad del líquido. Si en esta fórmula se hace $A = 1 \text{ cm}^2$ dv/dC igual a la unidad (diferencia de velocidad de un centímetro por segundo a un centímetro de distancia) resulta $F_v = \eta$

El coeficiente de fricción interna de un líquido es igual a la fuerza (en dinas) necesaria para mantener el movimiento estacionario de dos capas de líquido de un centímetro cuadrado de área con la unidad de gradiente de velocidad, en la dirección normal a la del movimiento.

Las dimensiones de η resultan:

$$[\eta] = M \cdot L^{-1} T^{-1} \quad (\text{form. 3})$$

La unidad de viscosidad en el sistema c. g. s. es el "poise"; la inversa de la viscosidad se llama fluidez $\rho = 1/\eta$

1.- Fórmula para tubos capilares.

Consideremos una porción AB de un tubo cilíndrico de radio R (fig. I) y llamemos P, a la diferencia de presión que es mantenida entre A y B durante el escurrimiento de líquido a través del tubo.

Se hace la suposición que en el escurrimiento cada partícula del líquido se mueve paralelamente al eje del cilindro, con una velocidad constante v; por razones de simetría esta velocidad debe ser la misma para todos los puntos situados sobre una misma circunferencia, de tal modo que se puede considerar el líquido como compuesto de láminas cilíndricas, que se mueven con una velocidad, que es función del radio. La fuerza ejercida por la presión P, sobre un cilindro de radio r es:

$$F_p = \pi r^2 P \quad (\text{form. 4})$$

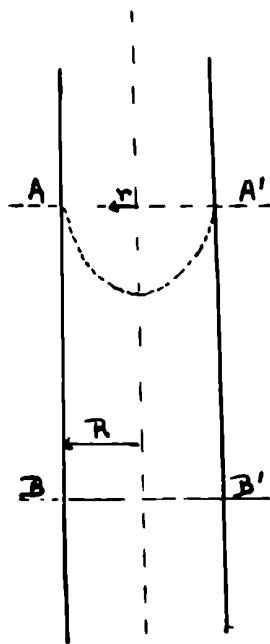


Fig I

La fuerza Fv originada por el frotamiento interno del líquido, se obtiene aplicando la fórmula (2) y teniendo en cuenta que es:

$$A = 2\pi Lr \quad \text{y} \quad c = r$$

resulta: $F_v = 2\pi Lr \eta \frac{dv}{dr}$ (form. 5)

Si el movimiento es estacionario, la velocidad debe ser constante y la fuerza Fp ejercida sobre el cilindro debe ser igual y opuesta a Fv.

$$F_p = -F_v$$

$$rP = -2L\eta \frac{dv}{dr}$$

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{rP}{2L\eta}$$

Integrando $\int dv = \frac{P}{2L\eta} \int r dr + C$

$$v = -\frac{r^2 P}{4L\eta} + C \quad (\text{form. 6})$$

para $v = 0 \quad r = R$

$$C = \frac{R^2 P}{4L\eta}$$

reemplazando en (6)
$$v = \frac{P}{4 L \eta} (R^2 - r^2) \quad (\text{form. 7})$$

La ecuación (7) es la de una parábola cuyo eje es el eje de las v , mientras que el eje de las r , está a la distancia $R P/4L$ del máximo de la curva.

Puesto que v es la distancia recorrida en la unidad de tiempo, las partículas que están en el plano AA' en el tiempo cero, después de la unidad de tiempo estarán en la superficie del paraboloides de revolución cuya sección que contiene el eje v está dada por la fórmula (7).

El volumen del paraboloides es el volumen de líquido Q , que pasa por unidad de tiempo.

El volumen de ese sólido de revolución es:

$$Q = 2\pi \int_{r=0}^{r=R} v r dr$$

Introduciendo el valor de v obtenido en la (7) e integrando

$$Q = \frac{\pi P R^4}{8 L \eta} \quad (\text{form. 8})$$

Como el escurrimiento es constante resulta que el volumen en el tiempo t , es:

$$Q_t = \frac{\pi P R^4}{8 L \eta} \cdot t \quad (\text{form. 9})$$

Esta fórmula, denominada de "Poiseuille", fué hallada experimentalmente por este autor y demostrada por Hagenbach.

2.- Correcciones de la fórmula de Poiseuille (3).

Teniendo en cuenta la energía cinética que adquiere el líquido y la perturbación en el flujo laminar que se origina en los extremos libres del capilar, Couette modificó la fórmula (9) en la siguiente forma:

$$\eta = \frac{\pi P R^4 t}{8 Q (L + \lambda)} - \frac{m \rho Q}{8 \pi t (L + \lambda)} \quad (\text{form. 10})$$

Donde

ρ : peso específico

m : constante

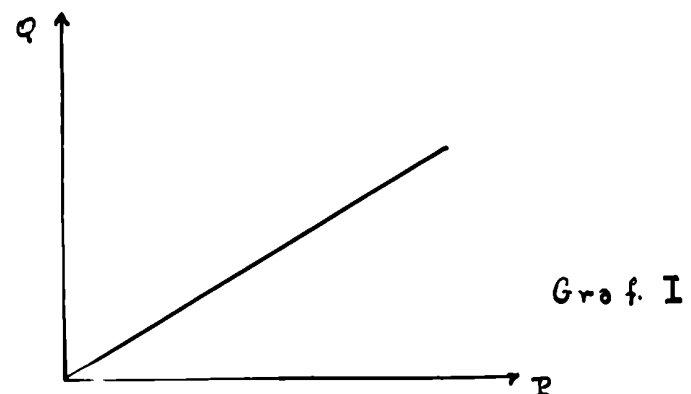
λ : una longitud adicional

3.- Líquidos newtonianos y no newtonianos.

De la fórmula de Poiseuille se deduce que la cantidad de líquido que

escurre por un capilar en la unidad de tiempo (caudal) es proporcional a la diferencia de presión entre los extremos del capilar.

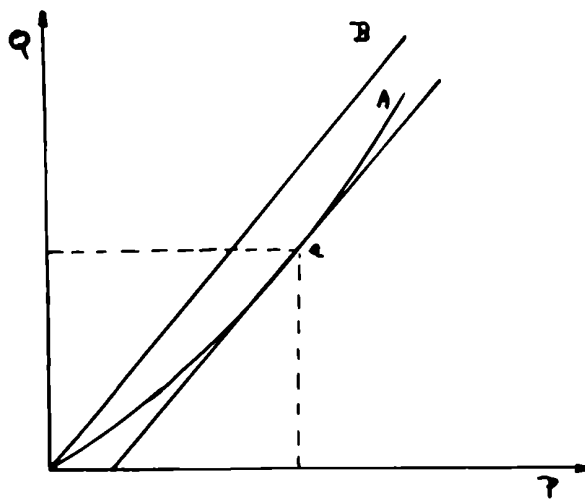
Definiremos como líquidos newtonianos aquellos que cumplen esta condición. El diagrama P-Q es una recta que pasa por el origen:



La comprobación experimental de la fórmula (9) se ha hecho para líquidos simples de viscosidad baja, pero no se ha demostrado experimentalmente hasta ahora que líquidos cuya viscosidad sea del orden de las determinadas por nosotros cumplan seguramente la ecuación de Poiseuille y por lo tanto la relación $F = \eta A \frac{dv}{dr}$ en que se basa la deducción de aquella. Sólo en este caso tendría un sentido preciso hablar de viscosidad del líquido como una propiedad del material y no un valor experimental que depende de las condiciones del ensayo.

Denominaremos líquidos no newtonianos a aquellos en que no se verifique la proporcionalidad entre el volumen de líquido que escurre por un tubo estrecho y la diferencia de presión entre sus extremos. En ellos no puede hablarse propiamente de viscosidad aunque habitualmente se hace, puesta esta noción supone la validez de la fórmula de Poiseuille.

Sea un líquido no newtoniano cuya curva representativa en el diagrama P-Q es la curva (A) del graf. II, nosotros denominaremos "viscosidad" del líquido no newtoniano correspondiente a la presión P la que correspondería a un líquido newtoniano cuya recta (B) en el mismo diagrama tuviera igual pendiente que la tangente a la curva A en el punto a.



Gráf. II

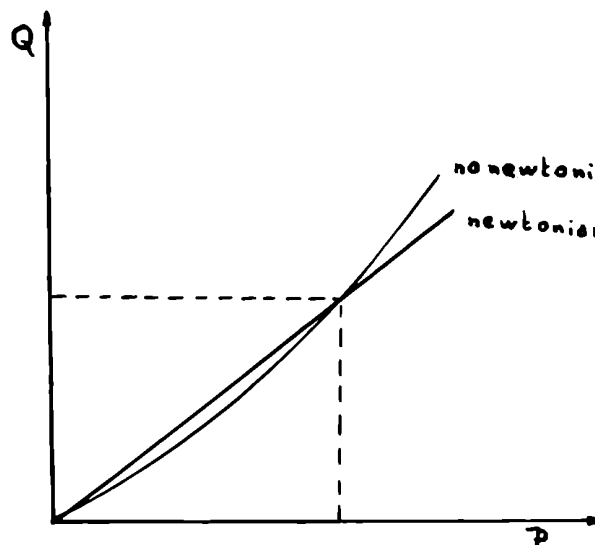
A la fórmula de Poiseuille puede darse la forma:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8L} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta V} \cdot t$$

análogamente para los líquidos no newtonianos calcularemos la "viscosidad" con la fórmula:

$$\eta^* = \frac{\pi R^4}{8L} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta V} \cdot t$$

Según esta definición, en los líquidos no newtonianos la "viscosidad" puede variar con la presión. Obsérvese que esta definición conduce a una aparente paradoja. Sean Q_1 y Q_2 los caudales correspondientes a dos líquidos, uno newtoniano y otro no newtoniano, sometidos a igual presión y en igualdad de todas las otras condiciones, puede ser Q_2 igual a Q_1 y no obstante tener viscosidades diferentes (punto P, graf. II):



Gráf. III

No es el caudal a una dada presión lo que determina el valor de la "viscosidad" sino la variación del mismo al variar la presión

II- METODOS

Un detallado estudio de los métodos de medida de viscosidad escapan al alcance de este trabajo; solamente haremos una breve enumeración y comentario de los mismos. Como clasificación general, podemos dividir los métodos en: empíricos y racionales, incluyendo entre los primeros aquellos que no poseen un fundamento científico suficientemente elaborado, como para que sus resultados puedan relacionarse en forma sencilla con magnitudes físicas bien definidas; y entre los segundos los que cumplen esta condición.

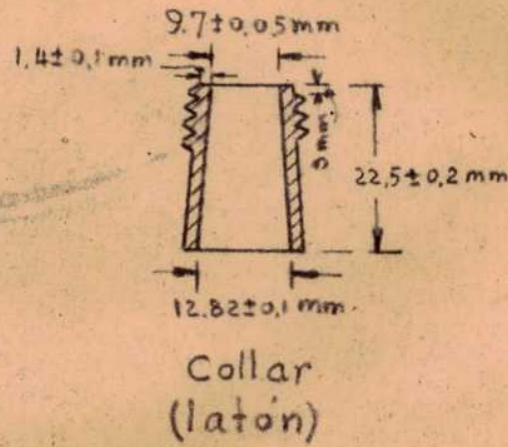
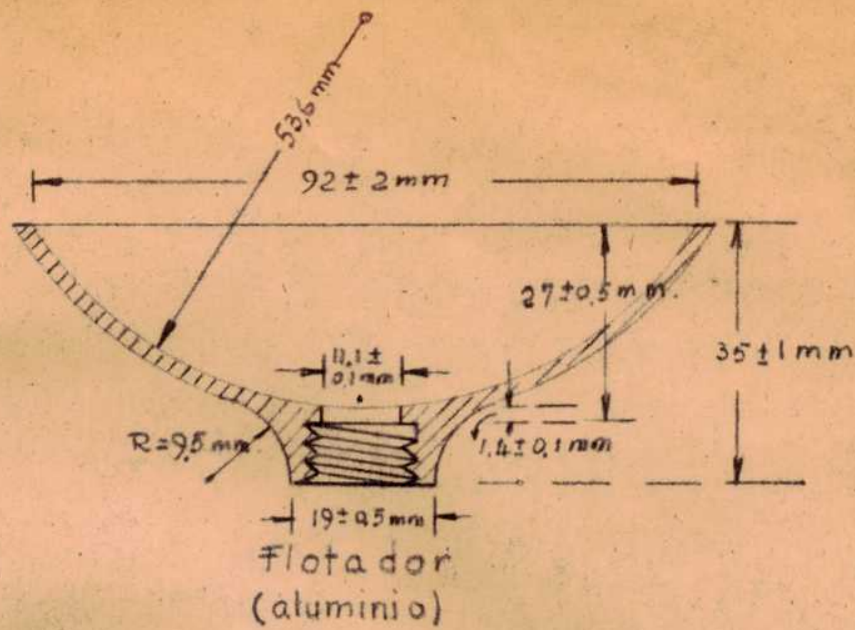
Como ejemplo típico de métodos empíricos citaremos los que se utilizan en la técnica para caracterizar los cementos asfálticos.

1.- Métodos empíricos.

Método de flotación (4).- En este método se emplea el dispositivo esquematizado en la fig. II.

Para efectuar este ensayo, se llena el aro (a) con el material, se enrosca luego al flotador (b) y se coloca todo en un baño de agua a temperatura constante (50°C); se mide el tiempo que transcurre (en segundos) desde que se coloca el flotador en el agua, hasta el instante en que ésta penetra en el flotador por haberse fluidificado el cemento asfáltico. Este periodo de tiempo expresa el "ensayo de flotación".

Es indudable que el resultado de este ensayo está relacionado con la variación de la viscosidad con la temperatura, pues el agua penetra en el flotador, cuando la viscosidad ha disminuido a tal punto que el empuje del agua en el fondo del aro vence el frotamiento interno del cemento asfáltico, pero es indudable también que otras propiedades del material afectan los resultados: conductibilidad térmica, tensión in-



Peso del Flotador $379 \pm 0.2 \text{ g}$
 " " Collar $9.80 \pm 0.2 \text{ g}$

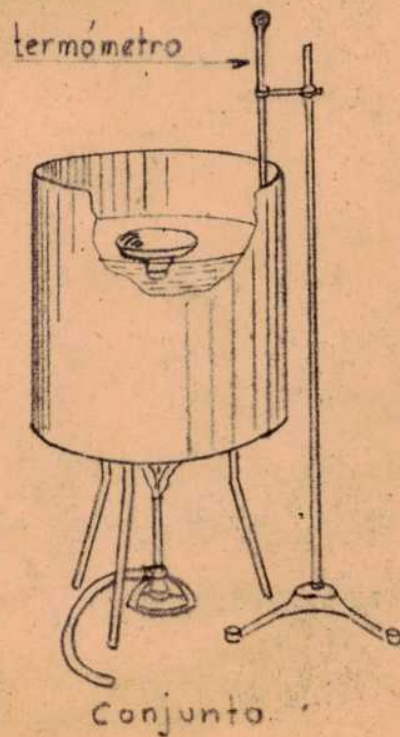


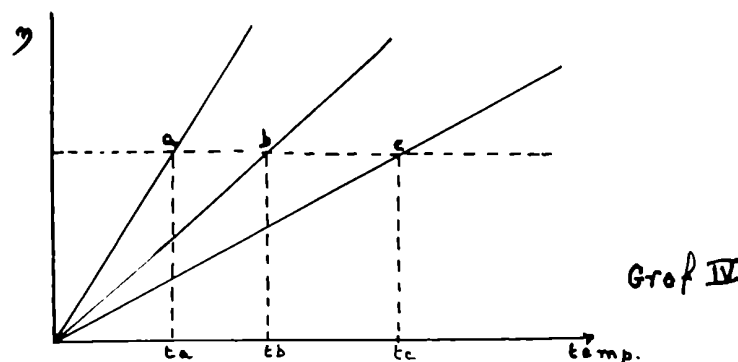
Fig II- APARATOS PARA EL ENSAYO DE FLOTACION

terfacial (agua-cemento asfáltico), peso específico, etc. Por estas razones no pueden interpretarse en forma sencilla los resultados y establecer la correspondencia con magnitudes físicas.

Método del punto de ablandamiento (5).- Se llena con el material de ensayo el arco (a) (fig. III) fijo al vástago (b); se coloca en el interior de un vaso con agua, se suspende un termómetro con el bulbo a la altura del anillo (c). En el centro del anillo sobre el betón, se coloca una esferita metálica de peso establecido (d) procediéndose al calentamiento del baño, de manera que la temperatura del agua se eleve a razón de 5°C por minuto.

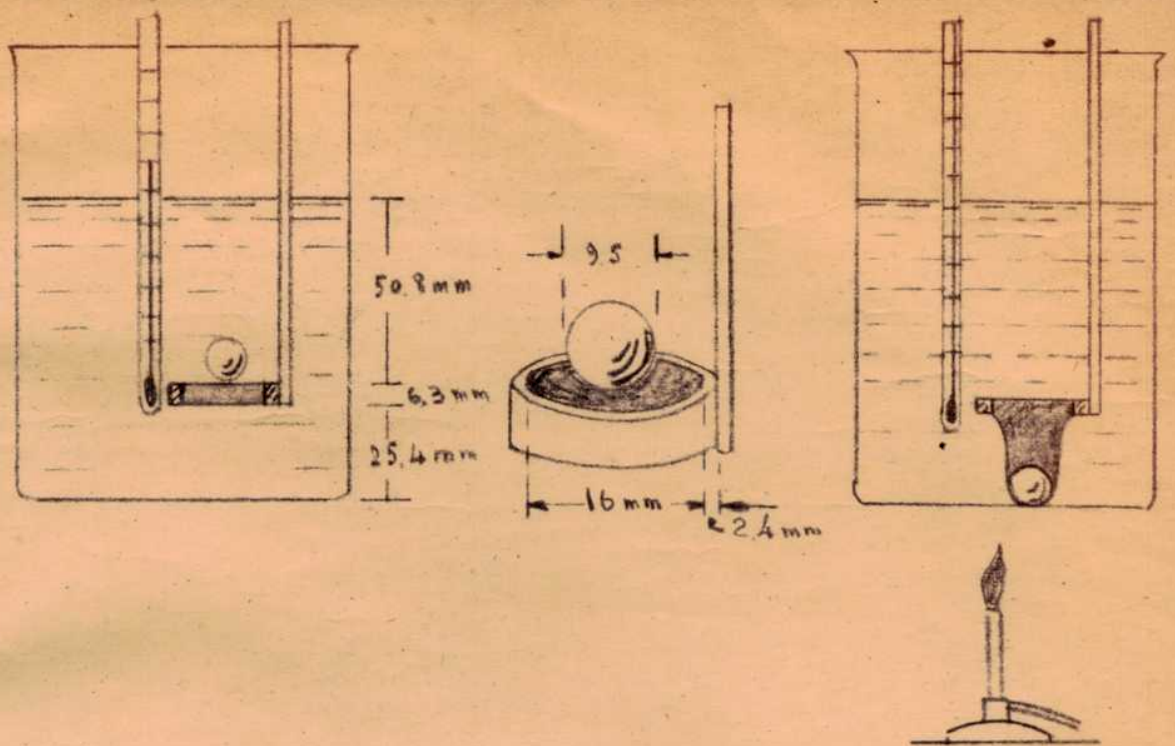
El punto de ablandamiento es la temperatura que indica el termómetro en el instante en que el betón, presionado por la esferita, toca el fondo del vaso.

Algunos autores han establecido una correspondencia entre los resultados experimentales y las propiedades reológicas del material. El punto de ablandamiento sería la temperatura a la cual el material alcanza un valor determinado de la viscosidad; un punto de ablandamiento bajo (t_a) puede interpretarse como una fuerte variación de la viscosidad con la temperatura (graf. IV)

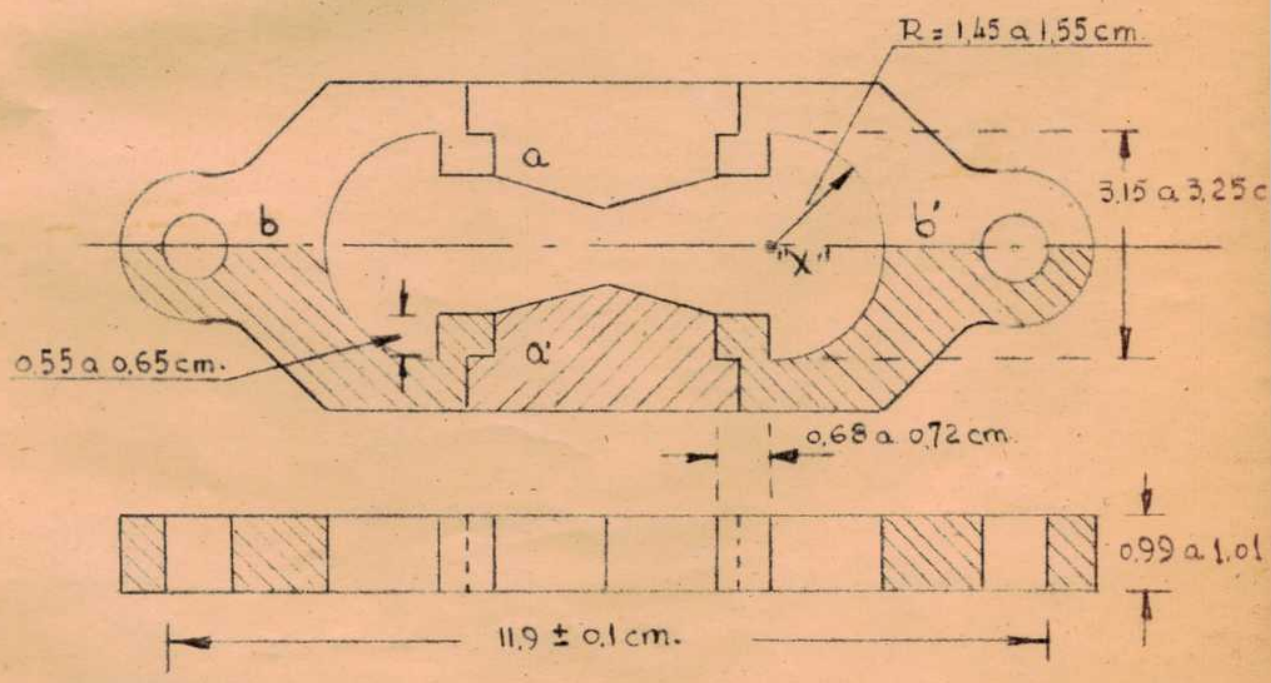


Aún cuando esta interpretación fuese correcta, como método para medir viscosidad, es de poca precisión, la temperatura del material no está bien definida, pues no se efectúa el ensayo a temperatura constante; además, otras propiedades del material interfieren, sin duda, en los resultados.

Ensayo de penetración (6).- Se denomina "penetración" de los asfaltos, al número de décimos de milímetro que penetra una aguja "stan-



PUNTO DE ABLANDAMIENTO.



MOLDE PARA EL ENSAYO DE DUCTILIDAD.

dard" en condiciones determinadas de carga, tiempo y temperatura.

Este ensayo se lo utiliza para determinar la "consistencia" de los asfaltos y evidentemente está relacionado con las propiedades reológicas de los mismos.

Diversos autores han tratado de establecer una fórmula que relacione la penetración con la viscosidad del asfalto. Así por ejemplo Saals y Koens (5) dan la siguiente relación para asfaltos newtonianos.

$$\eta = 5.13 \cdot 10^9 \cdot p^{-1.95} \quad (\text{form. 1})$$

:viscosidad 25°C; p! penetración a la misma temperatura (100gr. 5seg.)

Thelen (7) ha ideado para asfaltos no newtonianos un método que consiste en efectuar varias determinaciones de penetración a distintos tiempos, proponiendo la relación siguiente:

$$F = \frac{p_2 - p_1}{\Delta t} \quad (\text{form. 2})$$

Donde p_2 es la penetración en t_2 segundos

p_1 " " " " t_1 "

$$t_2 > t_1 \quad t_2 - t_1 = \Delta t$$

Thelen al cociente (form. 2) lo denomina flujo.

Rhodes y Volkman criticaron el método de Thelen y propusieron la misma fórmula que para el viscosímetro de cilindros coaxiales

$$\eta = (w/2\pi Lv) \log_e R/r \quad (\text{form. 3})$$

η : viscosidad

w : fuerza en dinas

v : velocidad con que desciende el cilindro

L : largo del cilindro interno

r : radio del cilindro interno

R : " " " externo

pero aplicando una corrección para la parte cónica de la aguja.

Charles Mack (9) propone dos fórmulas:

Para newtonianos:

$$\eta = \frac{F \cdot t}{c \cdot p \cdot x} \quad (\text{form. 4})$$

Para no newtonianos:

$$\eta = \frac{F^n \cdot t}{c \cdot p \cdot x} \quad (\text{form. 5})$$

F: esfuerzo de corte

t: tiempo

p: penetración

c: constante

c: "

x: " del instrumento

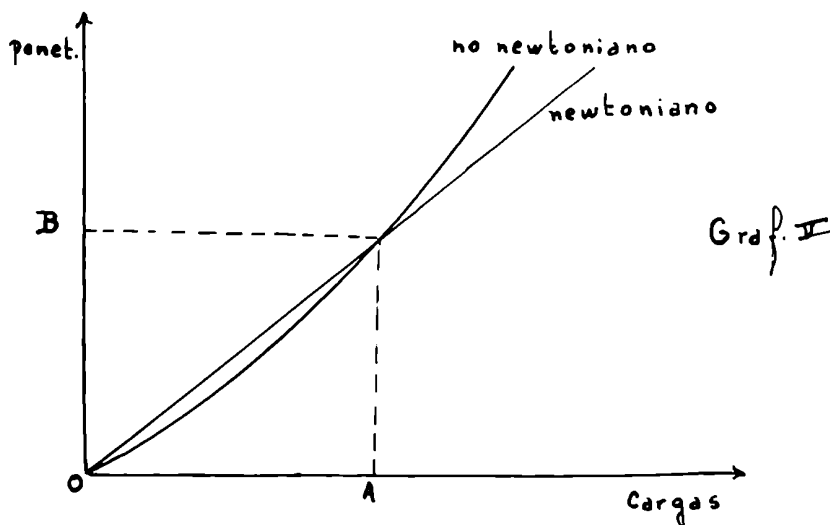
n: "

o y c, se hallan relacionadas por la

$$\text{fórmula } n = \frac{\log e}{\log e}$$

C. C. Mill y V. G. W. Harrison (10) hacen una crítica a la deducción de la fórmula de Ch. Marck y demuestran que su uso lleva a graves contradicciones originadas por partir de un concepto erróneo: "Los asfaltos que tienen la misma penetración en iguales condiciones, tienen la misma viscosidad".

Las objeciones al trabajo de Mack están bien fundamentadas, por la siguiente razón: Si se efectúan penetraciones a distintas cargas de materiales newtonianos y no newtonianos, se hallan experimentalmente curvas como las del graf. V para una dada carga (A) los materiales pueden tener la misma penetración (B). Si se comparan estas curvas con las del graf. I parece más razonable suponer que las viscosidades dependen no de la penetración misma, sino de la variación de la penetración con la carga. Los dos materiales representados (graf. V) tendrían la misma penetración (B), pero distinta viscosidad en contra de lo que supone Mack.



Todas las fórmulas hasta hoy conocidas solamente son aplicables en

algunos determinados casos y con escasa aproximación.

A simple título de curiosidad, hemos aplicado la fórmula de Saals y Koens comparando los datos de viscosidad que hemos obtenido a partir de la penetración aplicando dicha fórmula con los obtenidos con el viscosímetro que proponemos. Pueden obtenerse las conclusiones siguientes:

- 1) La fórmula no se cumple. Da valores bajos.
- 2) Materiales de igual penetración tienen aproximadamente igual viscosidad a presiones bajas ($14,47 \text{ Kg./cm}^2$) sean o no newtonianos.
- 3) Para materiales fuertemente no newtonianos, la viscosidad a esfuerzos de corte altos es inferior a la calculada por la fórmula.

Ensayo de ductibilidad (11).- El ensayo de ductibilidad consiste en el estiramiento de una briqueta de material bituminoso a velocidad y temperatura constante. La longitud que alcanza el hilo de material (en cm.) se expresa como "ductibilidad". También se han propuesto varias fórmulas para poder deducir la viscosidad a partir del ensayo de ductibilidad, pero ninguna de ellas da resultados satisfactorios.

Saals y Koens (12) dicen con respecto a este ensayo: "El esfuerzo de corte va aumentando continuamente a medida que disminuye el diámetro de la briqueta". Este es el inconveniente principal para poder establecer por medio de una fórmula una relación entre viscosidad y ductibilidad.

2.- Métodos racionales.-

Este tipo de métodos es conocido para viscosidades bajas desde el año 1839 mientras que para viscosidades altas fueron utilizados treinta años después.

Los métodos racionales se pueden clasificar del siguiente modo(13):
I.- Mediciones de resistencia al movimiento que experimenta un cuerpo en el seno de un fluido viscoso.

a) Se mide el amortiguamiento pendular en el fluido (Coulomb- Moriz-Stokes- Meyer- Maxwell- etc.) La teoría matemática de este tipo de mé-

todos es extremadamente complicada; generalmente se utilizan simplificaciones que traen como consecuencia, resultados que se separan considerablemente de los más aceptables.

b) Se mide la velocidad de caída de un cuerpo en el fluido (Stokes- Pisoti- Schöttner- Heen- Ojanes- Dupp- etc.)

En este grupo se utiliza la fórmula de Stokes para el caso de la caída de un cuerpo esférico en un líquido.

$$v = \frac{2}{9} \frac{r^2 (\delta - \delta')}{\eta} \cdot g \quad (\text{form. 6})$$

η : viscosidad absoluta

r : radio de la esfera

δ, δ' : densidad respectivamente del líquido y de la esfera

v : velocidad

g : aceleración de la gravedad

Los métodos expuestos carecen de interés para las determinaciones de altas viscosidades por adolecer de los inconvenientes siguientes.

- 1) Los esfuerzos de corte en ellos utilizados son pequeños.
- 2) Para altas viscosidades los ensayos son sumamente lentos.
- 3) No son prácticos para determinar viscosidades a diversos esfuerzos de corte.

II.- Cilindros y conos coaxiales.

Dentro del primer tipo podemos citar los métodos de: Stokes- Ver- mant- Boussinesq- Couette- Pochetting-etc.

Hemos tomado como tipos de este grupo a los aparatos de Couette (14) y Pochettino (15); haremos a continuación una breve descripción de ellos.

Aparato de Couette.- Consta el aparato de dos cilindros coaxiales verticales entre los cuales se encuentra el fluido viscoso. Se hace girar el cilindro exterior a una velocidad constante, el líquido ad- quiere un movimiento de rotación estacionario que tiende a comunicár- se al cilindro interior. Será necesaria una cierta cupla para mante-

ner este cilindro en reposo, copia que puede ser producida por la torsión del hilo metálico del cual está suspendido el cilindro interior.

Este dispositivo fué utilizado por primera vez por Couette y su teoría desarrollada por Stokes, llevando a la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{N \phi}{4 \pi L \omega} \cdot \frac{R_2^3 - R_1^3}{R_1^2 \cdot R_2^2} \quad (\text{form. 7})$$

N' : momento elástico del alambre.

ϕ : ángulo de desviación.

L : longitud del cilindro interior.

ω : velocidad angular del cilindro exterior

R_1 : radio del cilindro interno

R_2 : " " " externo.

Esta fórmula se cumple solamente hasta un cierto valor límite de la velocidad angular deducida por Mallock (16). Esta velocidad equivale al número de Reynolds para los capilares.

$$n_c = \frac{1900 \cdot \eta}{R_2^2 - R_1^2} \quad (\text{form. 8})$$

Una variación al dispositivo de Couette es el de Searle en el cual, en lugar de girar el cilindro exterior, gira el interior.

Aparato de Pochettino.- Este aparato, como el anterior, está constituido por dos cilindros coaxiales. El cilindro interno es fijo, mientras que el externo es libre; el espacio dejado entre los dos cilindros después de centrarlos, se llena con la substancia que se quiera ensayar.

El cilindro interno por acción de su propio peso se desplaza paralelamente al eje produciendo un arrastre viscoso del líquido.

La viscosidad se calcula midiendo un dado desplazamiento y el tiempo transcurrido desde su iniciación y aplicando la fórmula de

$$\eta = \frac{W}{2 \pi L v} \log \frac{R}{r} \quad (\text{form. 10})$$

Una adaptación de este aparato es el utilizado por R. N. Traxler (16) para el estudio de cementos asfálticos.

En el segundo tipo, es decir de conos coaxiales, citaremos el de C. F. Goodrive y G. W. Whitfield (17)

El dispositivo está basado en el mismo principio que el tipo Couette, pero los cilindros coaxiales se han reemplazado por conos, siendo desplazable longitudinalmente el cono interno.

Los conos se sumergen en el líquido hasta un nivel marcado en el aparato. Las revoluciones del cono exterior accionado por un sistema mecánico, produce un arrastre viscoso del cono interior, el cual se mide por la deflección de un dial.

$$\eta = \frac{F}{A} \cdot \frac{R_1^2 - R_2^2}{2 R_1^2} \cdot \frac{1}{\Omega} \quad (\text{form. 11})$$

Ω : velocidad angular

R_1 : radio del cono interior al centroide

R_2 : R_1 , más la separación

F : fuerza aplicada

A : área

η : viscosidad

III.- Medida del flujo a través de un tubo.

(Redwood- Vogel- Ossag- Bingham- etc.)

El método más corriente para determinar el coeficiente de viscosidad es todavía en principio el de Poiseuille, con pequeñas modificaciones aportadas por los diversos investigadores.

El líquido es obligado a atravesar un tubo; y se deduce del volumen escurrido en la unidad de tiempo, de la presión y de las dimensiones del aparato.

La principal ventaja de este tipo de sistemas con respecto a los demás, consiste en la facilidad con que se puede mantener constante la temperatura; además, la teoría es rigurosa y las fórmulas pueden aplicarse con muy pocas limitaciones.

La fórmula utilizada en este método es la hallada experimentalmente por Poiseuille y deducida por Wiedemann y Hagenbach.

$$\eta = \frac{\pi P R^4}{8 L Q} \quad (\text{form. 12})$$

Fórmula de la que nos hemos ocupado detalladamente con anterioridad.

Con fines ilustrativos adjuntamos la tabla de R.N.J. Saal (13) de algunos viscosímetros conocidos para determinar altas viscosidades.

Nombre	Principio	Viscosidades poises
Redwood	Capilar	1-50
Vogel-Ossag	Capilar	10^{-1} - 10^2
Viscosímetro de caída.	Un cuerpo cilíndrico cae en un tubo corto y ancho lleno de material de ensayo	$1-10^5$
Couette.	El espacio dejado entre dos cilindros coaxiales se llena de material de ensayo, se hace girar el cilindro externo y produce un arrastre viscoso del interno.	10^4-10^8
Pochettino	El espacio dejado entre dos cilindros coaxiales se llena del material de ensayo, se miden los desplazamientos del cilindro interno con respecto al externo.	10^7-10^{10}
Viscosímetro de barra.	Una barra de material de 10.2.2, se sujeta en sus extremos y se carga en su medio	10^7-10^{18}

Williams. Un cilindro de material de 0,5 de alto es comprimido entre dos platos. 10^3-10^4

Ungar. El material es sometido entre dos casquetes esféricos, al esfuerzo producido por el giro de uno de ellos $10-10^3$

III- PARTE EXPERIMENTAL

A continuación describiremos el dispositivo que hemos utilizado para la medición de viscosidades absolutas de cementos asfálticos cuyos rangos de viscosidad alcanzan como hemos dicho a 10^{+6} poises.

Este dispositivo está basado en el método de escurrimiento por tubos capilares, pero usando tubos de 3 a 5 mm. de diámetro y presiones de 15 a 100 kg./cm.² para obtener un escurrimiento de material que pueda medirse con precisión.

En la primera parte de este trabajo se ha supuesto válida la fórmula de Poiseuille y con ella hemos obtenido los valores de la viscosidad consignados en las tablas y gráficos, pero entendiendo que requiere la comprobación experimental de su validez.

Más adelante hemos verificado que entre el caudal y el radio del tubo, en líquidos newtonianos o aproximadamente newtonianos existe la relación:

$$V \cdot KR^4 \quad (\text{form. 1})$$

como lo exige la fórmula de Poiseuille. Sólo restaría establecer la proporcionalidad inversa entre el caudal y la longitud del capilar para obtener la comprobación experimental de la extensión, a líquidos de muy alta viscosidad, de la teoría que hemos desarrollado anteriormente.

1.- Descripción del método.

El viscosímetro propiamente dicho (fig. IV), está construido en bronce. Consta de un cilindro (a) cuya parte inferior interna, tiene una rosca en la cual se ajustan los tubos de distintos diámetros y longitudes (b). Además tiene un pistón de bronce macizo, que ajusta perfectamente con la pared interior del cilindro, por medio del cual se transmite las presiones al material que se ensaya (c).

El viscosímetro se introduce en un termóstato (fig. V) constituido

VISCOSIMETRO

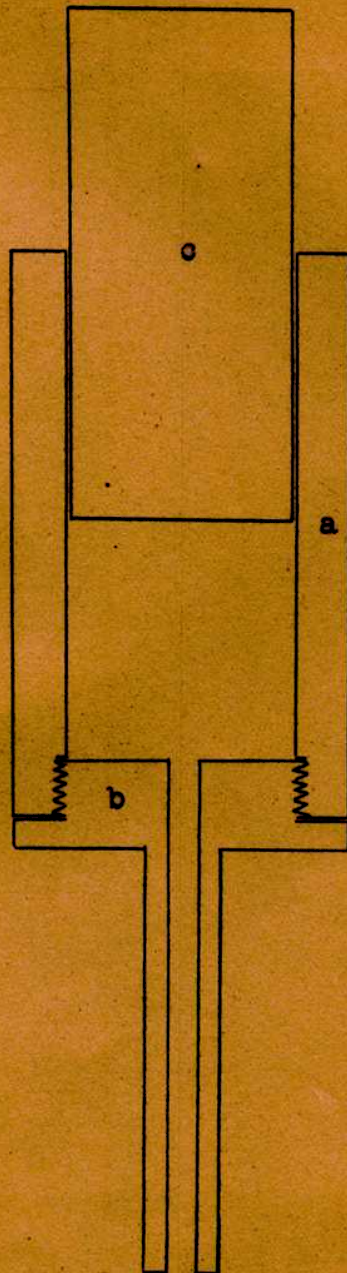


FIGURA IV

por un recipiente con doble pared, cuyo espacio medio se halla relleno con lana de vidrio (a) y exteriormente está forrado con paño (b).

El fondo, que es el que sostiene el viscosímetro, está constituido también por una doble pared, pero la exterior es una plancha de hierro de 5 mm. de espesor a la cual van fijadas cuatro patas. En el centro del fondo hay un agujero circular que pone en comunicación el extremo inferior del tubo del viscosímetro con el exterior (c), este agujero en la parte interna del termostato se prolonga con un reborde que permite unir por medio de un cilindro de goma (d) el cuerpo del viscosímetro, para evitar pérdidas de agua en el termostato. Obsérvase en esta figura un cilindro (e) el cual tiene por finalidad defender el tubo de las posibles deformaciones.

Para obtener las distintas presiones utilizamos la máquina "Olsen" para ensayos de compresión hasta 10 toneladas. La máquina, según se puede observar (fig. VI) consta de dos plataformas, una móvil (A) que se desplaza por medio de cuatro tornillos, los cuales son accionados por un juego de engranajes movidos por una manija. Una vuelta de la manija si se coloca en E desplaza la plataforma móvil 1 mm. mientras que colocada en D los desplazamientos se reducen aproximadamente a 0,1 mm.

La plataforma fija B se halla colocada sobre un juego de palancas por medio del cual se transmite la carga a un fiel (G) que se equilibra corriendo el contrapeso (H) mediante la manivela (I).

Por lectura directa en el fiel de la balanza se leen las cargas directamente de 50 en 50 Kg. mientras que las fracciones de las mismas se leen en el tambor (J).

2.- Ejecución de las medidas.

Se ajusta el tubo al cilindro del viscosímetro y éste se llena con el material siguiendo un "standard" establecido, se coloca luego en el termostato, el cual se ubica en la plataforma fija de la balanza "Olsen".

Cuando se consigue la uniformidad y constancia de temperatura, se

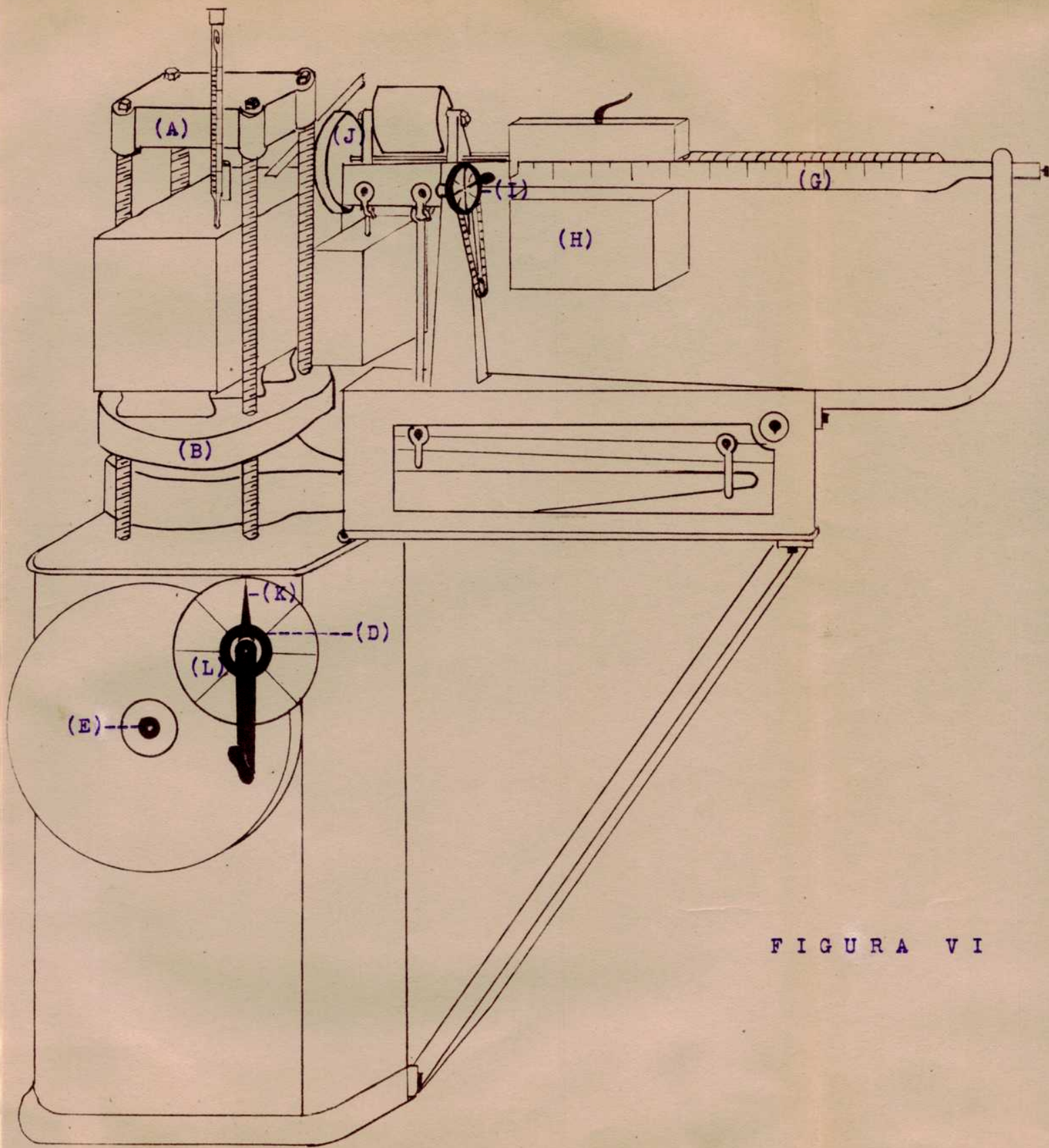


FIGURA VI

baja la plataforma móvil hasta oprimir el pistón, cuya parte superior seoma a través de un orificio de la tapa del termostato, se continúa oprimiendo hasta que la balanza acusa una fuerza mayor que la máxima del ensayo a fin de producir un acomodamiento del sistema y llenar el tubo con material.

Se coloca en la balanza la carga con que se va a trabajar. Puesta la manija en D (fig. VI) se comienza a dar vueltas lentamente, hasta que se eleva el fiel, y se mantiene en equilibrio, variando la velocidad de giro.

Una vez en régimen, en el instante en que la flecha (X) acomodada a la base de la manija, pasa por el cero del disco (L) se pone en marcha el cronómetro y se cuentan el número de vueltas que se dan en un intervalo de tiempo establecido (en nuestro caso 5 minutos) y leyendo las fracciones de vuelta en el disco (L). Para obtener las viscosidades a distintas presiones se repite el proceso para cada carga.

La carga que se aplica al pistón obliga al material, que se encuentra en el cilindro del viscosímetro a escurrir a través del tubo del mismo, recogiendo el material en un vaso que se coloca debajo de la boca del tubo.

3.- Errores.

Descrito el método, y recordando que en él se deduce la viscosidad basándose en la fórmula de Poiseuille:

$$\eta = \frac{\pi P R^4}{8 L Q} \cdot t \quad (\text{form. 2})$$

vamos a estudiar, su variación con tanto la temperatura, de que modo influyen los errores en las distintas magnitudes, sobre la viscosidad, para luego considerar las precauciones que se tomaron para asegurar, en lo posible, la eliminación de los errores sistemáticos y la determinación de los errores accidentales.

Derivando la ecuación de Poiseuille, con respecto a P, tenemos:

$$\frac{\partial \eta}{\partial P} = \frac{\pi R^4 t}{8 L Q} \quad \partial \eta = \frac{\pi R^4 t}{8 L Q} \partial P \quad (\text{form. 3})$$

Dividiendo (form. 2) por (form. 3)

$$\frac{\partial \eta}{\eta} = \frac{\partial P}{P} = \epsilon_P$$

lo que indica que el error relativo del coeficiente de viscosidad es igual al error relativo con que se midió P.

Siguiendo el mismo procedimiento, para las distintas variables, tenemos:

$$\epsilon_t = \frac{\partial \eta}{\eta} = \frac{\partial t}{t}; \quad \epsilon_L = \frac{\partial \eta}{\eta} = \frac{\partial L}{L}; \quad \epsilon_a = \frac{\partial \eta}{\eta} = \frac{\partial a}{a}; \quad \epsilon_R = \frac{\partial \eta}{\eta} = \frac{4 \partial R}{R}$$

De lo expuesto, se deduce que el error relativo de P, t, L y a es igual al de la viscosidad, pero el error relativo de R cuadruplica al de la viscosidad.

4.- Presión. P

Como hemos dicho, para aplicar las presiones utilizamos la balanza "Olsen". Este tipo de máquinas está hecho para asegurar el 1%.

Para verificar si las fuerzas acusadas eran las que realmente se efectuaban entre sus dos plataformas, careciendo de resortes calibrados y de otros aparatos que existen para este objeto, pesamos distintas cantidades de plomo, en una balanza que aseguraba los 100 gramos y con ellas se controló la máquina "Olsen"; construyendo con los datos obtenidos un gráfico cargas reales- diferencia (graf. VI) y establecemos por deducción del gráfico una tabla de correcciones (tabla II)

Lecturas	Cargas reales
Kgr	Kgr
100	107,4
200	214,7
300	322,1
400	429,5
500	536,8
600	644,2
700	751,6

Tabla II

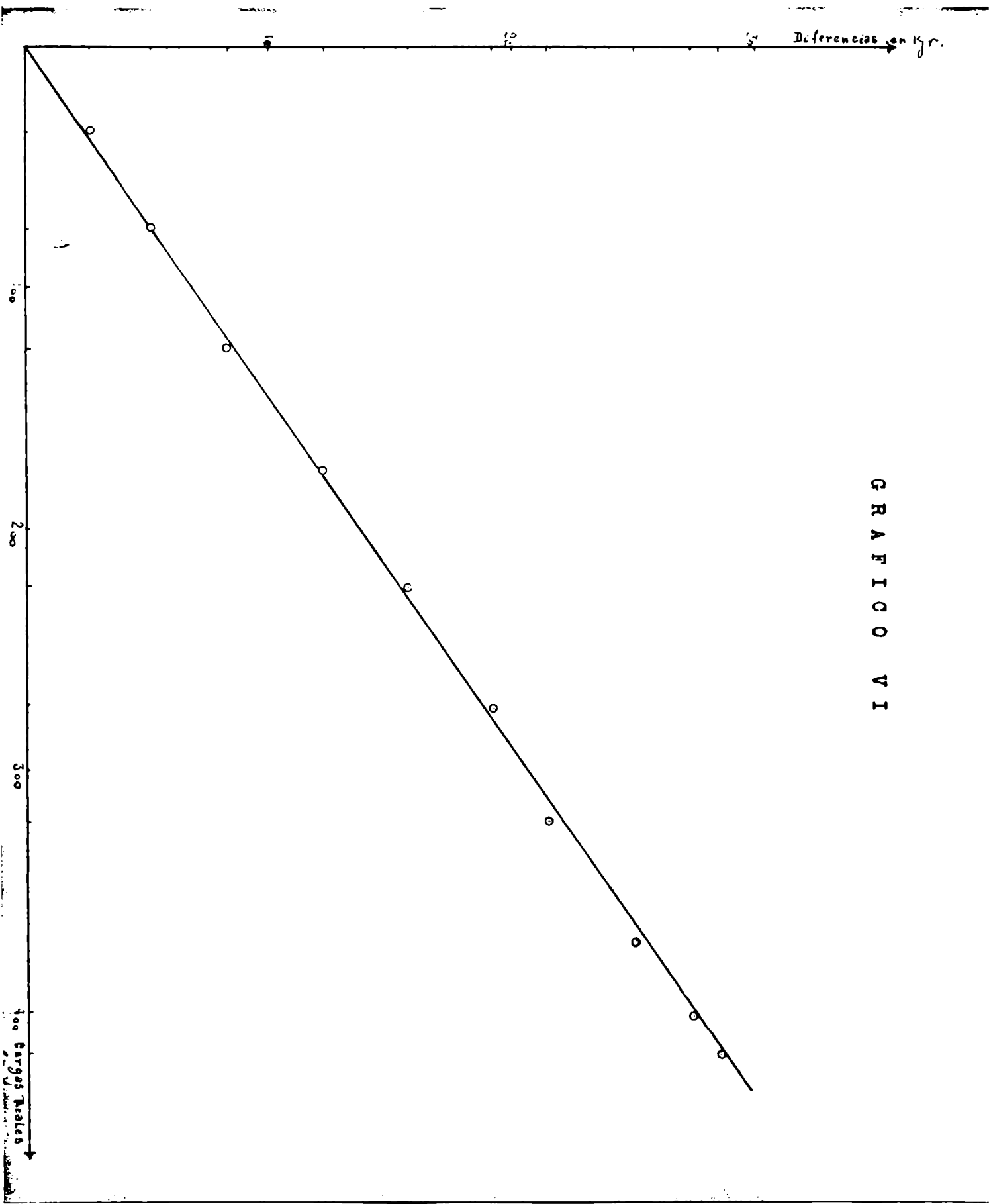


GRAFICO VI

Las cargas, divididas por la sección del pistón cuyo radio lo determinamos con un cartabón de corredera, al décimo de milímetro, nos dan las presiones (tabla III).

Diámetro del pistón $D = 29.7 \text{ m.m. } \epsilon = 0.5 \%$
 Sección $S = 6.93 \text{ m.m. } \epsilon = 1.0 \%$

Lecturas	Presión
	kg/cm ²
100	15,48
200	30,98
300	46,47
400	61,96
500	77,45
600	92,94
700	108,43

Tabla III

Las presiones son determinadas, por lo tanto, con un error

$$\epsilon = 1 \%$$

5.- Tubos

En nuestro trabajo hemos utilizado tres tamaños de tubos que los designamos con los números I, II y III; la longitud y radio del tubo I fueron determinados con poca precisión, no así los tubos II y III cuyas determinaciones han sido motivo de un estudio minucioso. Longitud.- La longitud del tubo en este tipo de aparato puede ser determinada con gran exactitud, cosa que no se podría hacer si el tubo formara un todo con el viscosímetro. Después de pulidos los extremos de los tubos, las mediciones se efectuaron con un cartabón de corredera, que apreciaba el centésimo de milímetro.

Tubo I $L = 45.1 \text{ m.m. } \epsilon = 0.2 \%$

Tubo II

n	L
	mm.
1	78,31
2	32
3	32
4	31
5	34
6	35
7	32
8	34
9	33
Prom.	78,34

Tabla IV

$\epsilon = 0.02\%$ $L = 78.34 \text{ mm.}$

Tubo III

n	L
	mm.
1	78,96
2	95
3	96
4	98
5	97
Prom.	78,96

Tabla V

$L = 78.96$ $\epsilon = 0.01\%$

Radio. R.- El radio en el tubo I se determinó midiendo los radios extremos con un comparador Hilger que aprecia el 0,001mm. y promediándolos.

Tubo I $R = 2.52$ $\epsilon = 0,4\%$

En los tubos I¹ y III se determinó los radios extremos y medios en la forma que describimos:

Radios extremos.- Para esta determinación, los tubos previamente fueron sometidos a un esmerado pulido, sobre una placa de vidrio con tres tipos de abrasivos; el primero esmeril fino obtenido por decantación en agua, el segundo esmeril de un grado de fuerza mayor y tercero talco.

La eficiencia del pulido se verificó por pulidos y mediciones sucesivas hasta que la diferencia entre dos mediciones no fuera mayor de 0,005mm.

A fin de tener una idea de la regularidad de la curvatura en las secciones, se efectuaron medidas de los diámetros en cada extremo,

haciendo girar la pieza 45° cada vez.

Se designan por ϕ_1, ϕ_2 , etc. a los diámetros de los extremos correspondientes a cada 45° de giro.

Tubo II

Diámetros	ϕ	E	ϵ
Superiores	mm.	E.10 ³	%
ϕ_1	3,236	±0,5	0,02
ϕ_2	3,265	-	-
ϕ_3	3,262	±0,5	0,01
ϕ_4	3,261	±0,8	0,02
Promedio	3,261		

Tabla VI

Tubo III

Diámetros	ϕ	E	ϵ
Superiores	mm.	E.10 ³	%
ϕ_1	4,228	±0,7	0,01
ϕ_2	4,208	±0,3	0,007
ϕ_3	4,213	±0,5	0,01
ϕ_4	4,216	±0,7	0,02
Promedio	4,216		

Tabla VII

Tubo II

Diámetros	ϕ_i	E	ϵ
Inferiores	mm.	E.10 ⁰	%
ϕ'_1	3,205	±0,5	0,01
ϕ'_2	3,200	±1	0,03
ϕ'_3	3,213	±0,7	0,02
ϕ'_4	3,221	±1	0,03
Promedio	3,209		

Tabla VIII

Tubos HI

Diámetros	e'	$\cdot E$	ϵ
Inferiores	mm.	$E \cdot 10^3$	$\%$
e'_1	4,208	$\pm 0,3$	0,07
e'_2	4,202	$\pm 0,8$	0,02
e'_3	4,209	$\pm 0,2$	0,005
e'_4	4,202	$\pm 0,5$	0,01
Promedio	4,205		

Tabla IX

Radio medio.- Para la determinación de radios interiores de tubos opacos, existen dispositivos especiales (18); nosotros nos concretamos a determinar los radios medios, efectuando las medidas por llenado de los tubos con parafina, pues el llenado con mercurio, para nuestro caso no es factible, debido a que éste se amalgama con el bronce.

Antes de exponer el método seguido para la determinación de R, hablemos de la determinación de la densidad de la parafina, dato que nos fué necesario conocer.

La mayor dificultad en obtener un dato preciso de la densidad de la parafina estriba en la facilidad con que ésta ocluye cantidades considerables de aire. Por esta razón es que, después de vertida la cantidad suficiente de parafina en el picnómetro, fué necesario mantenerla fundida mientras se hacía el vacío y luego dejarla solidificar en esas condiciones.

Densidad de la parafina a 19°C.

$$\delta_{19^\circ\text{C}} = 0.8989 \pm 0.0005 \quad \epsilon = 0.05 \%$$

Parte experimental.- Se pesaron los tubos en una balanza de precisión, después de lavarlos con xilol y cetona y se procedió al llenado, que siendo necesario efectuarlo al vacío, por razones expuestas, se consiguió con el dispositivo que a continuación describimos:

El aparato (fig. VII) consta de un embudo A, que en la parte superior tiene un tapón de goma atravesado por un tubo de vidrio, al cual

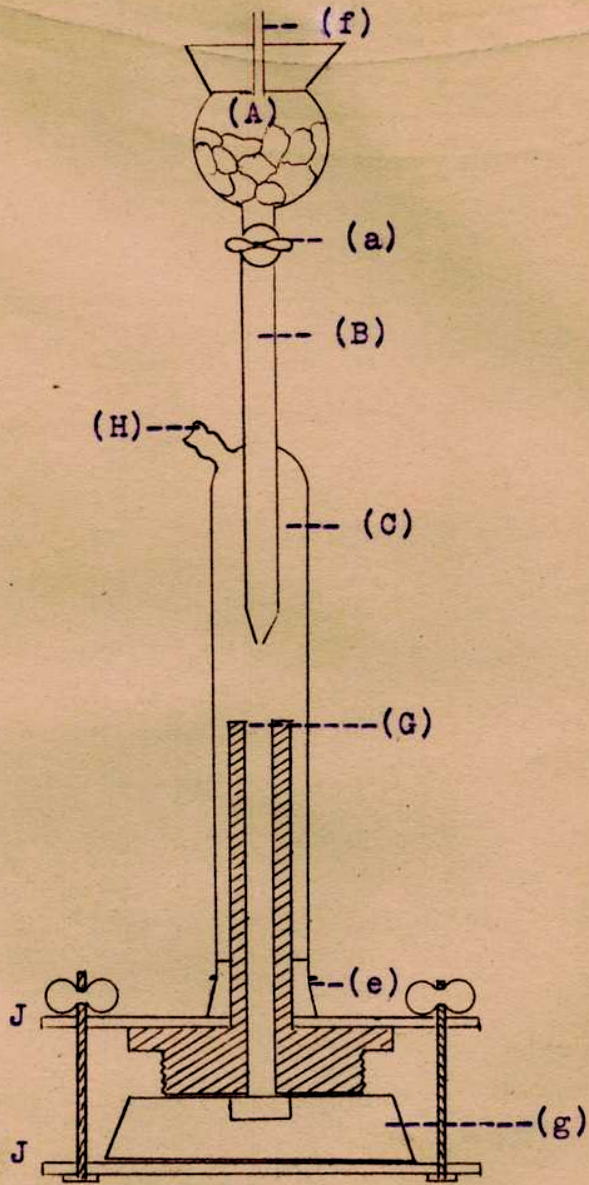


FIGURA VII

se le adapta una goma de vacío, en su parte inferior el embudo tiene una llave esmerilada (a). El tubo del embudo (B), está soldado a otro de mayor diámetro (C), al cual se le hace el vacío por el tubo (H).

El tubo (C), se adapta por medio de un tapón de goma (e) al del viscosímetro. Para obturar el extremo inferior del tubo del viscosímetro, se le puso una pieza de goma (g), con una pequeña excavación cilíndrica, que tiene como finalidad prolongar el cilindro de parafina que se forma, para luego de enfriado, poder enrasar. La pieza de goma va fijada al tubo con 2 planchas de bronce y 4 bulones (j).

Modo de operar.- Una vez armado el aparato como se ve en la figura, se llena el tubo (A), de parafina en pequeños trozos, teniendo cerrada la llave (a); hecho esto se coloca todo dentro de la estufa a 100°. Los tubos (f) y (H), se conectan a una bomba de vacío.

Cuando la parafina funde, se abre la llave (a) y la parafina comienza a gotear por el extremo del tubo (B), llenando entonces el tubo (G) del viscosímetro y rebalsando hasta ocupar el espacio existente entre los tubos (e y G), cerrando (a), cuando la parafina alcance un centímetro arriba del extremo superior del tubo (G).

Se saca el aparato de la estufa y se deja enfriar a temperatura ambiente, manteniendo fundida la parafina depositada sobre el tubo (G), con una pequeña llama, a fin de que la solidificación de la parafina se inicie en la parte inferior del tubo; luego, se va disminuyendo el calentamiento poco a poco hasta la solidificación completa. Hecho esto, se coloca todo en un vaso con hielo y salmuera el cual se deja unos 30 minutos; se desconectan los tubos (b y H), y se calienta rápidamente en la llama reductora el tubo (C), para poder sacar el aparato; se aflojan los bulones sacando las planchuelas y la pieza de goma (g), quedando el tubo con el tapón (e), y la parafina como se ve en la (fig. VIII).

Luego se saca la parafina que rodea al tubo, dejando un tapón de la misma en la parte inferior y superior, y se saca el tapón (e). Se su-

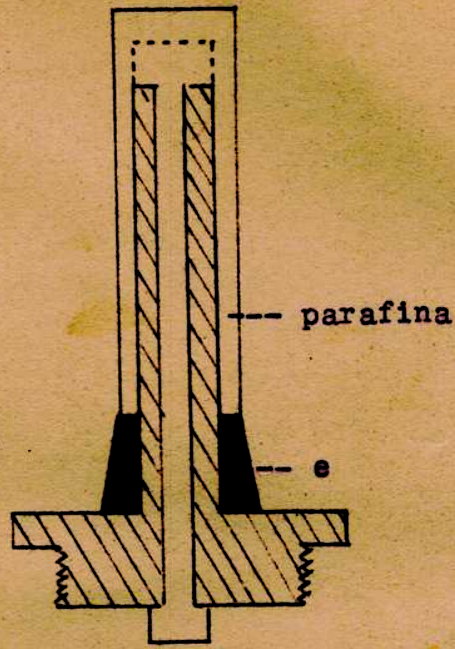


FIGURA VIII

merge nuevamente el tubo en la mezcla frigorífica, por espacio de 30 minutos, transcurridos los cuales se retira y se engrasa la parafina en sus dos extremos, con una hojita de acero. Se lima el tubo con xilol, teniendo cuidado de no tocar la boca del mismo, y luego con acetona, secándolo con aire. En esta condición, el tubo es llevado a la temperatura a que se determinó la densidad de la parafina (18°), engrasando nuevamente los dos extremos, del mismo modo que la vez anterior, y una vez secado se pesa.

Con las pesadas del tubo, con y sin parafina, se calcula el radio medio.

Datos.-

Tubo II

n	R mm.
1	1,608
2	1,608
3	1,610
Promedio	1,609

Tabla X

Tubo III

n	R mm.
1	2,107
2	2,096
3	2,102
4	2,098
Promedio	2,101

Tabla XI

$$R = 1.609 \text{ m.m. } \epsilon = 0.05\%$$

$$R = 2.101 \text{ m.m. } \epsilon = 0.1\%$$

La influencia de la regularidad en la curvatura y concidad de los tubos, fué investigada experimentalmente por S. Erk y A. Schmidt (18).

A raíz de su experiencia consideran que el error motivado por la forma elíptica de la sección, no es mayor de 0,1%, cuando los semiejes no difieren en más de 2% y que la concidad no produce errores mayores de 0,1%, cuando la diferencia entre los diámetros medios en ambos extremos del capilar no es superior al 1%.

En nuestro caso, observando los datos obtenidos, se puede ver que son menores que esos errores. Así por ejemplo en el tubo III, la di-

ferencia en los semiejes, nunca es mayor de 0,5% y la diferencia entre los diámetros medios y extremos no difieren tampoco en más de 0,4%.

Haciendo el promedio entre los radios extremos y el medio, obtenemos el dato numérico que empleamos en nuestra determinación

Tubo II

n	R mm.	ϵ
Superior	1,628	0,02
Inferior	1,604	0,02
Medio	1,609	0,05
Promedio	1,617	

Tabla XII

$$R = 1.613 \text{ m.m. } \epsilon = 0.06\%$$

La diferencia entre los tres radios no es mayor del 1%.

Tubo III

n	R mm.	ϵ
Superior	2,108	0,01
Inferior	2,102	0,02
Medio	2,101	0,1
Promedio	2,103	

Tabla XII

$$R = 2.103 \text{ m.m. } \epsilon = 0.1\%$$

La diferencia entre los tres radios no es mayor del 0,4%.

6.- Material escurrido.

El material que escurre del viscosímetro es un cilindro de radio igual al del tubo. Para conocer su volúmen es necesario determinar la altura (o longitud) del cilindro que escurre en el tiempo considerado; así procede Bingham (20) en su plastómetro, pero en nuestro dispositivo es más sencillo determinar el peso del material y calcular el volumen conociendo el peso específico. Así lo hicimos en las primeras determinaciones. Pero hay una manera más sencilla aún que hace innecesarias las pesadas y el conocimiento del peso específico del material.

Como el líquido es incompresible, el volúmen que escurre por el orificio, es igual al que penetra el pistón; conociendo la sección de éste, y midiendo el desplazamiento, se obtiene el volúmen.

El espacio que penetra el pistón es igual al desplazamiento de la plataforma móvil, que lo determinamos del siguiente modo: Se fija en la máquina "Olsen" concéntrico con el eje de la ranija (D)(Fig.VI),

un círculo (L) de 10cm. de radio dividido en 100 arcos iguales y se acopló una flecha a la manija (K); con este dispositivo se puede contar el número de vueltas y determinar las fracciones de las mismas, dadas en un intervalo de tiempo.

La relación entre una vuelta y la distancia recorrido por la plataforma, se estableció en la forma que exponemos: Con un dial que apreciaba 0,001 de pulgada, sostenido sólidamente a la base de la máquina, por un soporte que permitía colocarlo sobre la plataforma móvil, apoyando su vástago sobre la misma, se fué leyendo lo que ésta descendía cada 10 vueltas.

Por cada vuelta, la plataforma desciende:

$$0.1316 \text{ m.m. } \epsilon = 0.01\%$$

Para obtener el error del volumen debemos conocer el error en la medición de la sección del pistón y en el número de vueltas.

Error en la sección.- El error en la sección es el doble del error relativo del diámetro del pistón y éste se ha determinado con un error de 0,5% y por lo tanto el error relativo de la sección es igual a 1%.

Error en el número de vueltas.- Por mediciones reiteradas en un mismo material y en igualdad de todas las condiciones, hemos establecido que el error relativo es igual a 0,5%.

Aplicando la fórmula de distribución de errores para el volumen, se obtiene un error relativo de 1%.

$$\epsilon_Q = 1\%$$

7.- Errores totales.

De lo expuesto, podemos hacer las siguientes conclusiones: las variables que figuran en la fórmula de Poiseuille las podemos establecer con el siguiente error relativo:

Presión ejercida $\epsilon : 1\%$

Longitud del tubo $\epsilon : 0,02\%$

Radio del tubo $\epsilon : 0,1\%$

Volumen escurrido $\epsilon : 1\%$

Aplicando la fórmula de distribución de errores

$$\epsilon_T = \sqrt{(\epsilon_p)^2 + (\epsilon_q)^2 + (\epsilon_L)^2 + (4 \epsilon_R)^2}$$

y teniendo en cuenta que en el tubo I el radio fué determinado con un error relativo del 0,4% y la longitud con el 0,2%, tenemos que la viscosidad determinada con el tubo I estará afectada de un error relativo de 2%, mientras que las determinadas con el tubo II y III, estarán afectadas de un error relativo de 1,4%.

Determinaciones experimentales
con cementos asfálticos

Las determinaciones experimentales se efectuaron sobre cementos asfálticos: Argentinos: Soaneado y Bitelco; y de los Estados Unidos de Norte América: Californiano y Coltex.

8.- Soaneado

Material original de Mendoza.

Penetración 30.

Temperatura del ensayo 20°C/

Tubo I

Los resultados experimentales de viscosidad a distintas presiones y están consignados en la tabla XIV y representados en el gráfico VII/

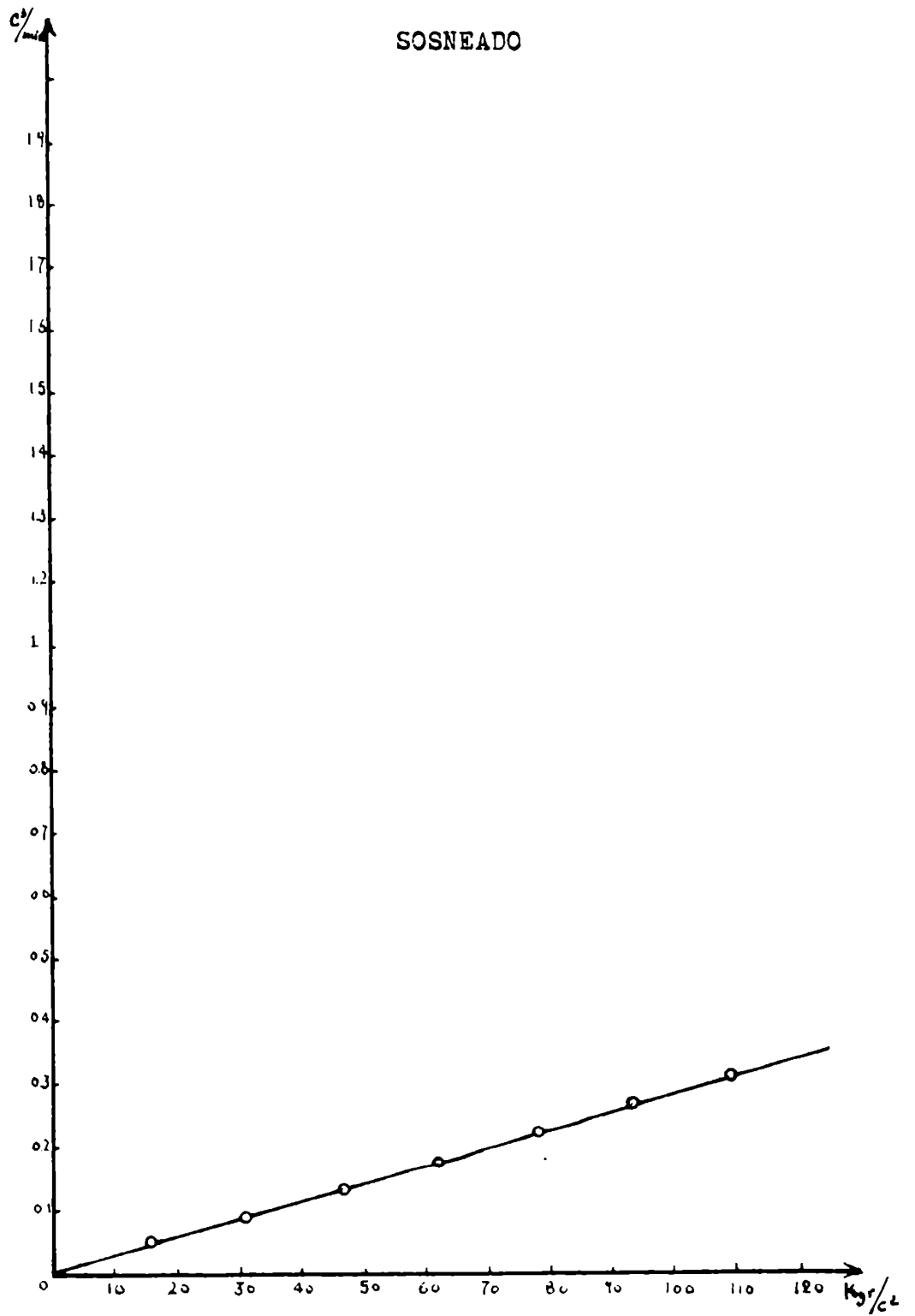
Puede observarse en el gráfico, que los puntos representativos se sitúan sobre una recta que pasa por el origen, de lo que se deduce que los volúmenes son proporcionales a las presiones, como exige la fórmula de Poiseuille:

$$Q = KP$$

Presiones	Viscosidades
kg/cm ²	poises. 10 ⁻⁶
30,87	6,77
46,47	6,98
61,96	7,22
77,45	7,01
92,94	6,95

GRAFICO VII

SOSNEADO



108,43	7,07
Promedio	6,91

Tabla XIV

Se desprende también de los datos de la tabla, que la viscosidad permanece constante.

9.- Californiano

Original de California (E.E.U.U.)

Penetración 85

Temperatura 20°C.

Tubo I

En nuestra experiencia sobre este cemento asfáltico, siempre hemos constatado que en contradicción con la literatura, si bien ligeramente, no se comporta como un líquido newtoniano como puede observarse en la tabla XV y el gráfico VIII.

Presiones	"Viscosidades"
kg/cm ²	poises.10 ⁵
15,49	6,13
30,98	6,38
46,47	6,74
61,96	7,02
77,15	7,21
92,94	7,52
108,43	7,77

Tabla XV

10.- Bitalco.

Material original de Comodoro Rivadavia

Penetración 80.

Temperatura 20°C.

Tubo I

Se puede observar (graf. IX) que el comportamiento de este betún corresponde al de un líquido típicamente no newtoniano. La "vis-

GRAFICO VIII
CALIFORNIANO

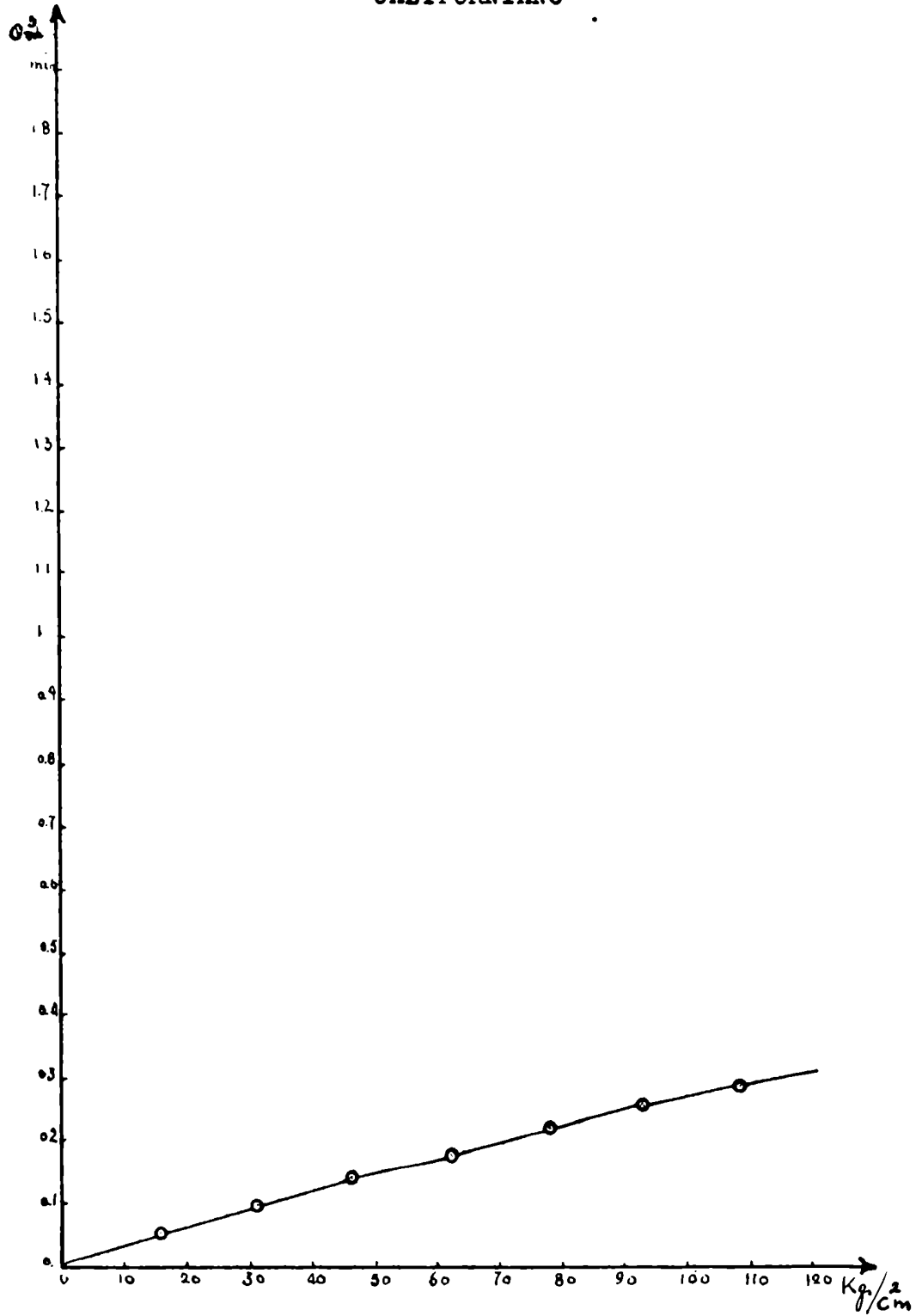
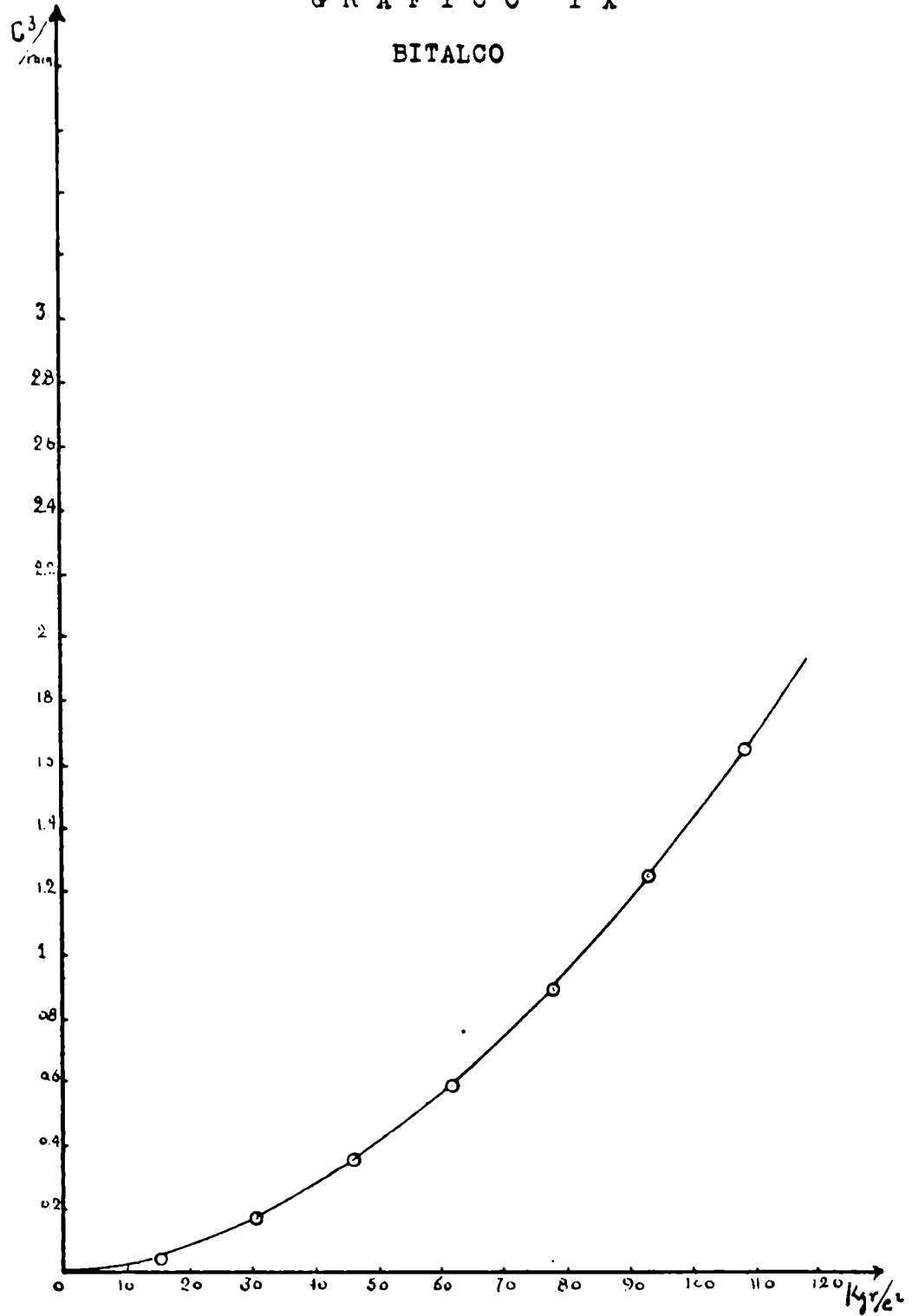


GRAFICO IX

BITALCO



cosidad" disminuye rápidamente con el aumento de presión, siendo curvas que pasan por el origen, con la concavidad vuelta hacia arriba.

A continuación se adjunta la tabla XVI correspondiente al gráfico.

Presiones	"Viscosidades"
kg/cm ²	poises.10 ⁻⁶
15,49	7,61
30,98	2,53
46,47	1,65
61,96	1,41
77,45	1,00
92,94	0,87
108,43	0,81

Tabla XVI

11.- Coltex.

Como dato informativo, agregamos a este trabajo los gráficos X y XI de dos cementos asfálticos originales de Texas (E.E.U.U.)

Coltex T- penetración 100 y Coltex OA-135 penetración-100. Los ensayos se efectuaron a 25°C.

Ambos dan concavidad en las curvas vueltas hacia el eje de las y , como en el caso del Bitalco, pero el carácter no newtoniano es menos pronunciado.

12.- Variación con la temperatura.

Las variaciones de la temperatura afectan considerablemente el coeficiente de viscosidad. Por no intervenir esta variable en la fórmula de Poiseuille, no lo hemos estudiado anteriormente.

Las primeras tentativas efectuadas en el sentido de establecer una fórmula que interpretara los datos experimentales, fueron efectuadas por Poiseuille, llegando

$$\eta_t = \frac{\eta_0}{1 + \alpha t + \beta t^2}$$

fórmula que se cumple solamente para un cierto intervalo de temperatura. Numerosas otras fórmulas de carácter también empíricas, han sido

GRAFICO X

COLTEX P.100

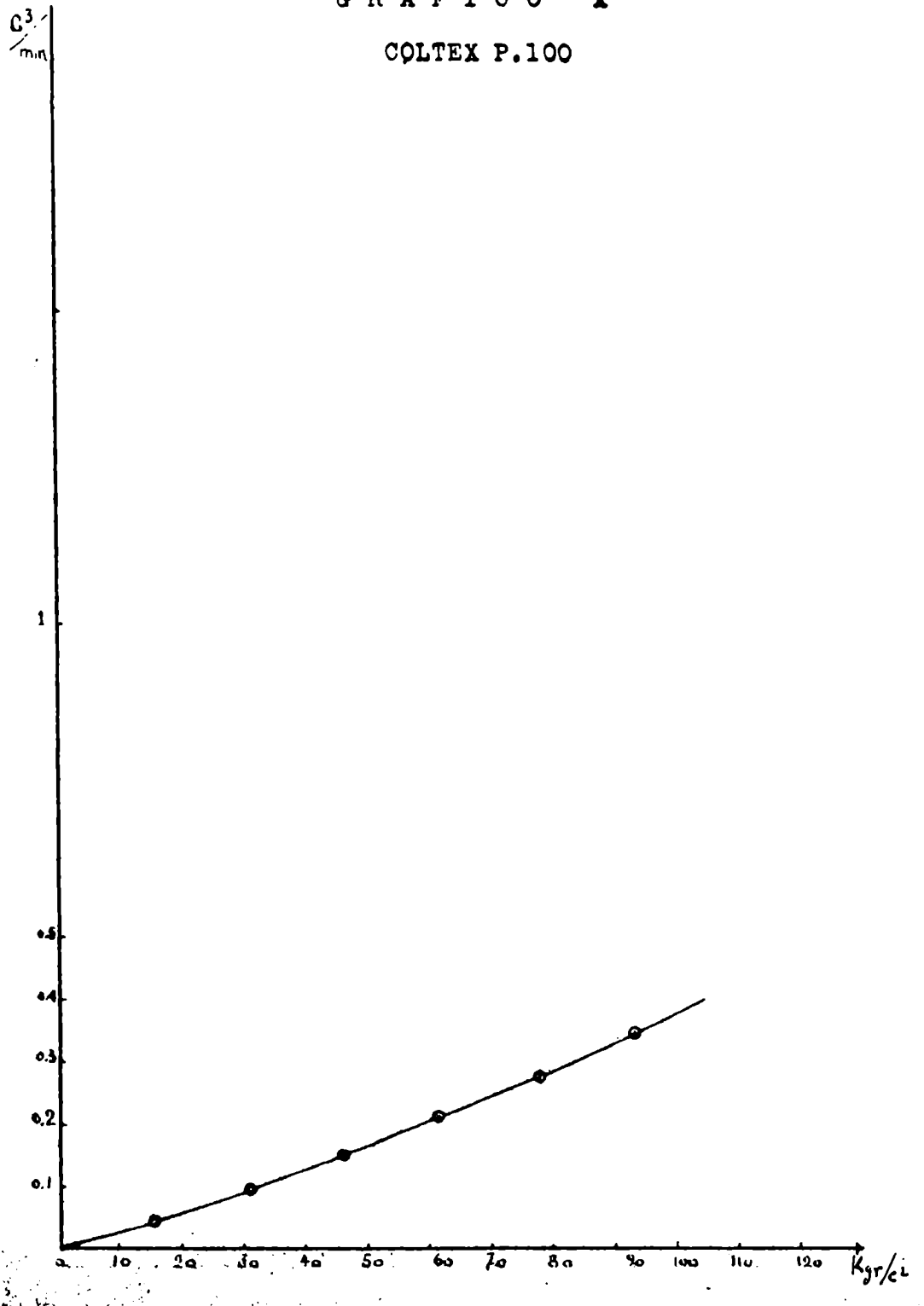
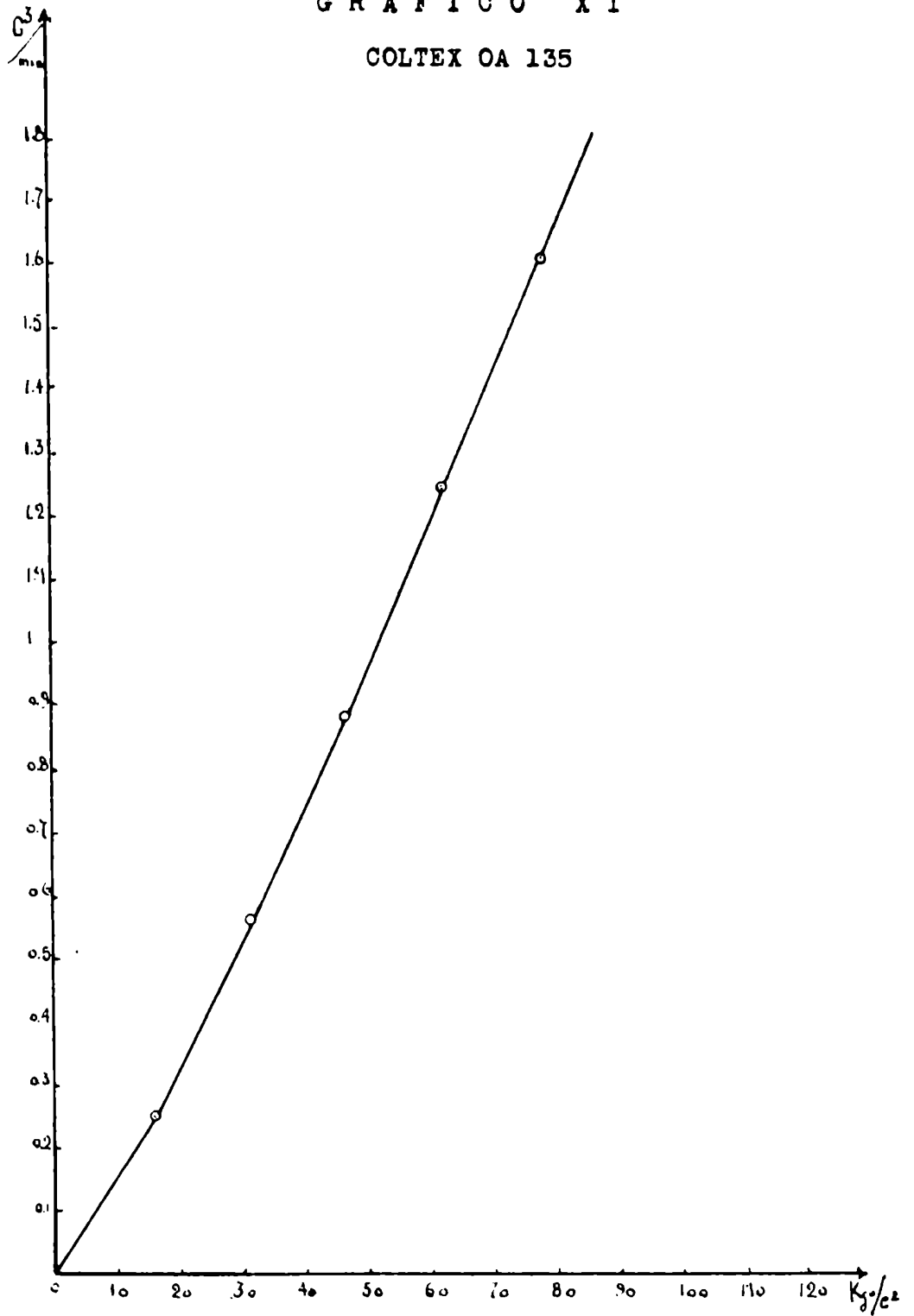


GRAFICO XI

COLTEX OA 135



propuestas posteriormente, tales como

$$\eta = \frac{e}{(a+t)^n} \text{ (Slotte) (21)} \quad \eta = \frac{A (t_c - t)}{t - t_1} \text{ (Graetz)}$$

Una fórmula que si bien no tiene ninguna base teórica particularizada, pero que ha sido deducida por analogía con otras ramas de la Física, es la propuesta por C. Andrade (22) y simultáneamente por S.E. Shipard

$$\eta = A e^{-B/T}$$

A y B: constantes

e : base de logaritmos naturales

T : temperatura

Esta fórmula es aplicable para líquidos no asociados.

Para el agua y los otros líquidos asociados:

$$\eta = A' e^{-B'/T \cdot \theta}$$

Por tener estas fórmulas una base teórica, las hemos elegido para interpretar nuestros resultados.

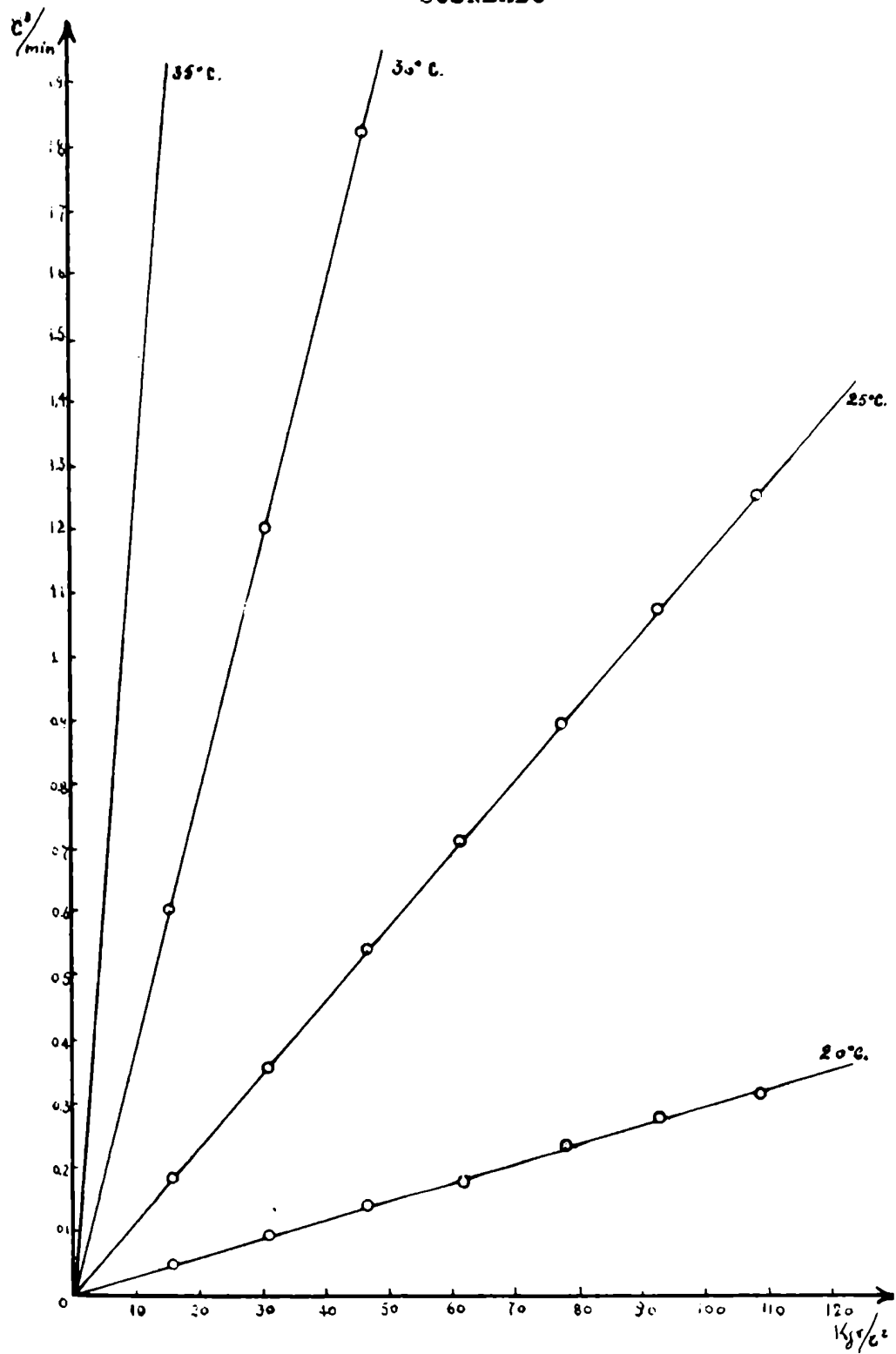
Resultados experimentales.- El viscosímetro que hemos descrito, puede utilizarse también para efectuar determinaciones a diferentes temperaturas. El baño termóstático se halla provisto de una aislación adecuada agitador mecánico y lámpara eléctrica de calefacción con un dispositivo sencillo de regulación. Con él hemos logrado efectuar determinaciones de temperaturas no muy alejadas del ambiente, con diferencias menores de 0,02°C. La constancia de temperatura ha sido verificada con un termómetro Beckman al 0,001°C.

Hemos determinado las variaciones de viscosidad con la temperatura del cemento asfáltico Soeneado, ya citado, obteniendo una familia de rectas (graf. XII), en el cual a medida que aumenta la temperatura, aumenta la pendiente (diagrama presiones-volúmenes). Las determinaciones se efectuaron a 20°, 25°, 30° y 35°C.

Pueden notarse las variaciones notables de la viscosidad, en un intervalo de temperatura de 15°C., en el cual se reduce aproximadamente 1/43 de su valor.

GRAFICO XII

SOSNEADO



$$20^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots : 6,91 \cdot 10^{-6}$$

$$35^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots : 0,16 \cdot 10^{-6}$$

Como expusimos al comienzo de este párrafo, de todas las fórmulas que relacionan temperatura y viscosidad, la más aceptable es la propuesta por Andrade. Hemos estudiado la verificación de la misma con los datos experimentales del betún del Sosneado.

Aplicando log. a (1), tenemos:

$$\text{Log}_{10} \eta = \text{Log}_{10} A - \frac{B}{T} \text{Log}_{10} e \quad (\text{form. 2})$$

haciendo: $\text{Log } \eta = \gamma ; \text{Log } A = a \quad -B \text{Log } e = b$

$$\frac{1}{T} = x$$

$$\gamma = a + bx \quad (\text{form. 3})$$

En la tabla XVII se han transcrito las viscosidades de este material a las distintas temperaturas, y en el gráfico XIII se han representado estos valores. El eje de las abscisas expresa $1/T$, y en el de las ordenadas $\text{log. } \eta$. Los puntos representativos se sitúan como puede observarse en el gráfico, sobre una recta de la que se puede deducir que para este caso es válida la fórmula adoptada.

Hemos calculado para este material, la constante B.

De la (form. 3) se deduce:

$$\frac{\Delta \gamma}{\Delta x} = b$$

$$\gamma = \frac{b}{\text{Log } e} \cdot B$$

$$B = 23 \cdot 10^5$$

El valor de la constante B concuerda con el dado para los asfaltos por R. Houwink (23)

Temperatura	Viscosidades
t°C	poises. 10^{-6}
20	6,91
25	1,75
30	0,53
35	0,16

Tabla XVII

GRAFICO XIII

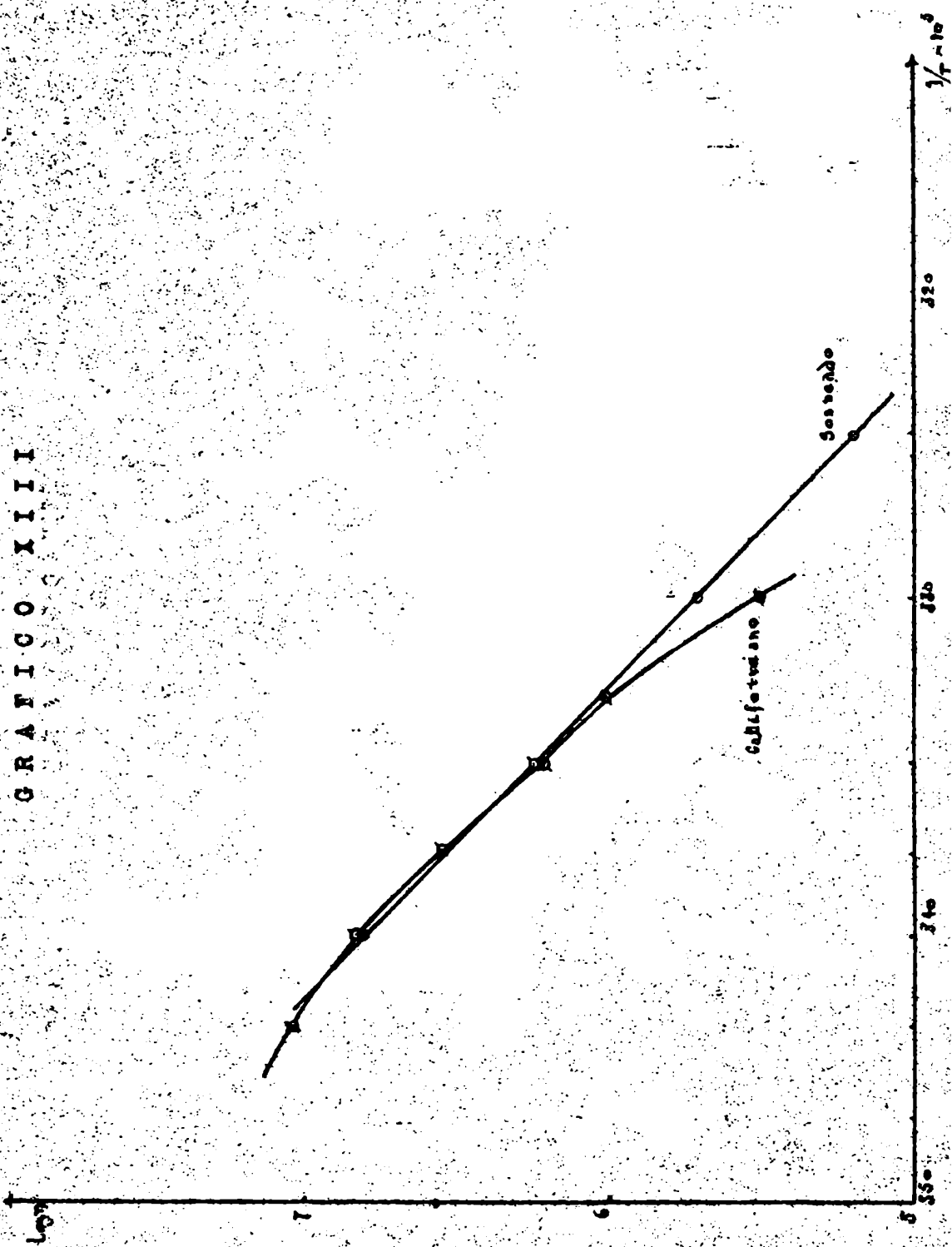
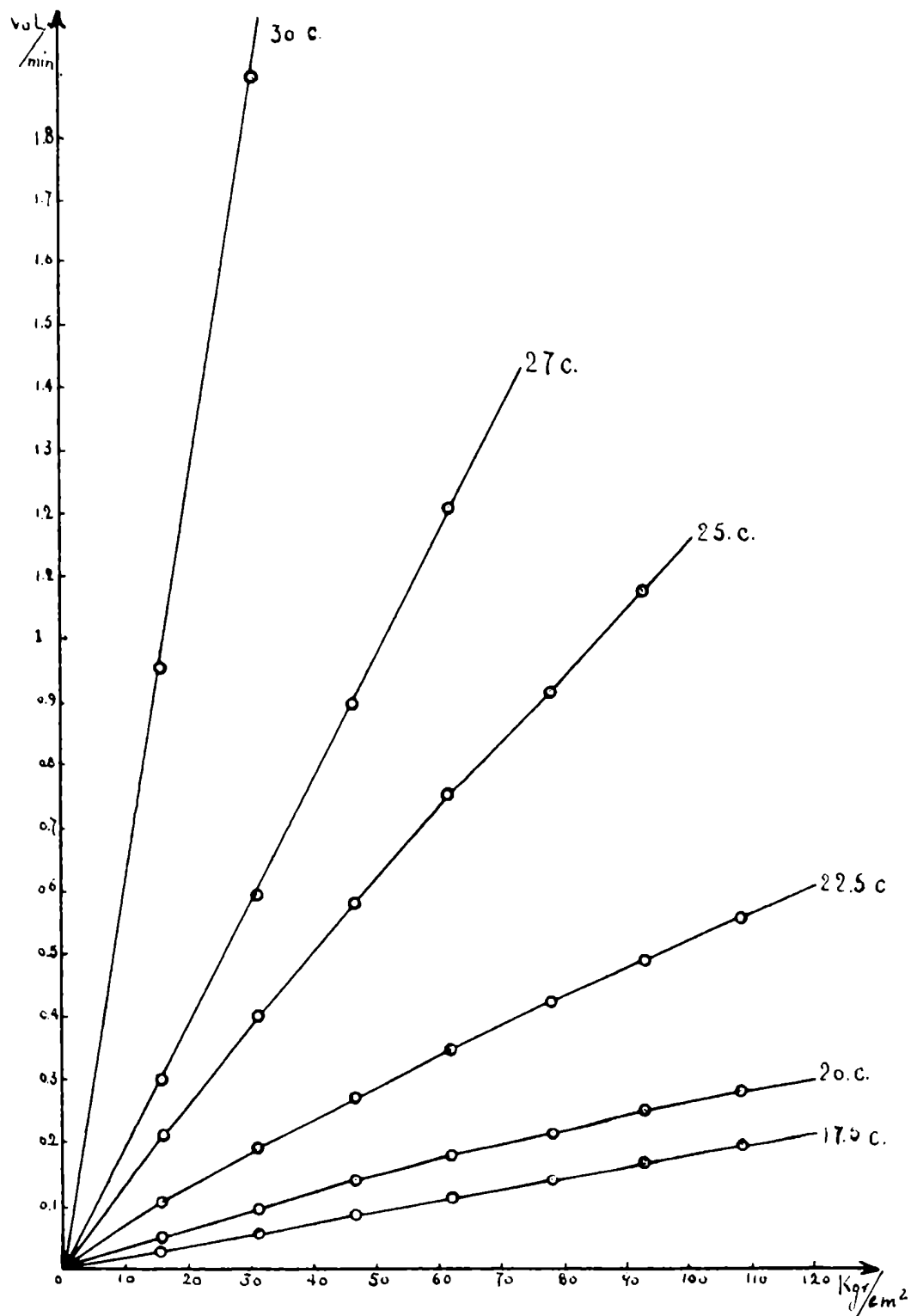


GRAFICO XIV

CALIFORNIANO



Determinaciones análogas se efectuaron para el Californiano; en el gráfico XIV se han representado los datos para las distintas temperaturas: 17,5°; 20°; 22,5°; 25°; 27° y 30°. En esta familia de curvas, se observa que a medida que aumenta la temperatura, va disminuyendo la curvatura, llegando así a la de 30°C., en la cual los puntos se sitúan sobre una recta.

Para este cemento, hemos aplicado también la fórmula de Andrade, pero para las "viscosidades" a presión constante (61.96 kg/cm²) se han tomado estos valores, debido a que este material se aparta ligeramente del comportamiento de los líquidos newtonianos.

Con los datos de la tabla XVIII se construyó la gráfica correspondiente (gráfico XIII), de la cual se deduce que en el intervalo.

Temperatura	Viscosidad
t°c	poises.10 ⁻⁴
17,5	11,2
20,0	7,02
22,5	3,64
25,0	1,67
27,0	1,04
30,0	0,73

Tabla XVIII

20°-30°C. se cumple la fórmula, teniendo para ese intervalo igual valor de B, que para el caso del Sosneado, mientras que, entre 17,5 y 30°C, se ve que no es una recta, sino una curva vuelta hacia el origen.

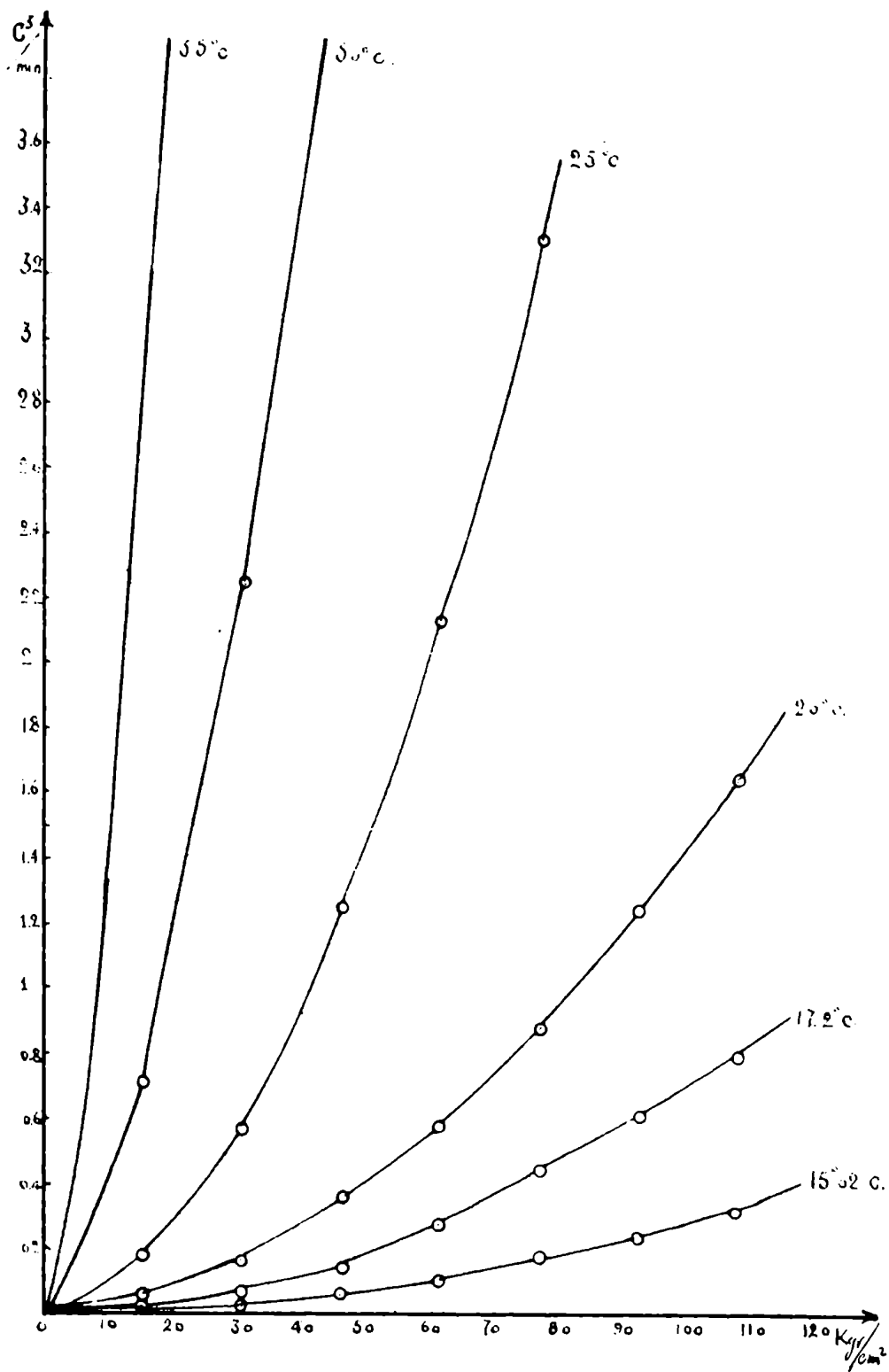
Finalmente, determinamos las variaciones de la "viscosidad" con la temperatura para el Bitalco, obteniéndose la familia de curvas (graf.XV).

13.- Determinaciones de viscosidad con tubos de distinto diámetro.

Efectuamos determinaciones de viscosidad con dos tubos de distinto diámetro, utilizando los números II y III, que son los que con mayor

GRAFICO XV

BITALCO



precisión determinamos sus radios y cuyos detalles de medición hemos expuesto.

Para efectuar estos ensayos se utilizó cemento asfáltico del Sosneado (Mendoza), ejecutando las medidas a 30°C. Penetración: 72

Este cemento asfáltico, a pesar de tener el mismo origen del citado en la página 30, es ligeramente no newtoniano.

Adjúntanse las tablas XIX y XX y los gráficos correspondientes XVI y XVII.

Presiones	$\eta \cdot 10^{-6}$
15,49	3,89
30,98	4,12
46,47	4,38
61,96	4,46
77,45	4,63
92,94	4,84

Tabla XIX

Presiones	$\eta \cdot 10^{-6}$
15,49	3,97
30,98	4,20
46,47	4,44
61,96	4,68
77,45	4,72

Tabla XX

En los datos expuestos, se observa que el de "viscosidad" obtenido con el tubo II, a una presión determinada difiere del correspondiente con el tubo III a la misma presión.

Como se trata de un material que no es rigurosamente newtoniano, es decir la "viscosidad" varia con la presión, pensamos inicialmente comparar las "viscosidades" con los tubos a igual presión, pero tratándose de tubos diferentes es necesario hacerlo a esfuerzos de corte iguales, es decir, a igual fuerza por unidad de área de los tubos de líquido elementales. Comparando las "viscosidades" a esfuerzo de cortes iguales, los datos son coincidentes, es decir, se verifica la proporcionalidad entre el volumen escurrido y la cuarta potencia del radio (para tubos de igual longitud) (tabla XXI).

El esfuerzo de corte EC. se expresa según la fórmula:

$$E.C. \frac{P \pi R^2}{2 \pi R L} = \frac{P R}{2 L}$$

GRAFICO XVI

SOSNEADO - Tubo II

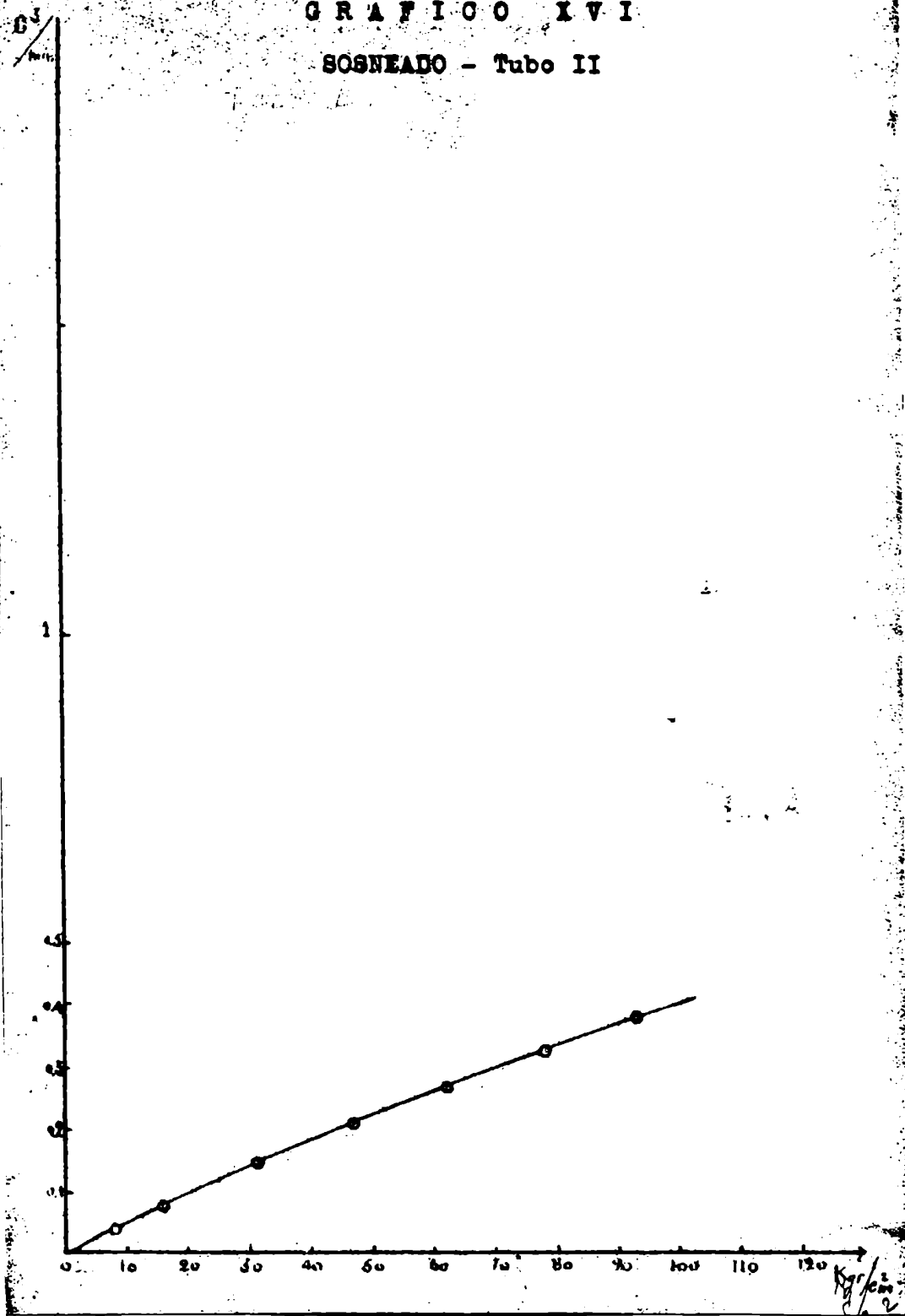
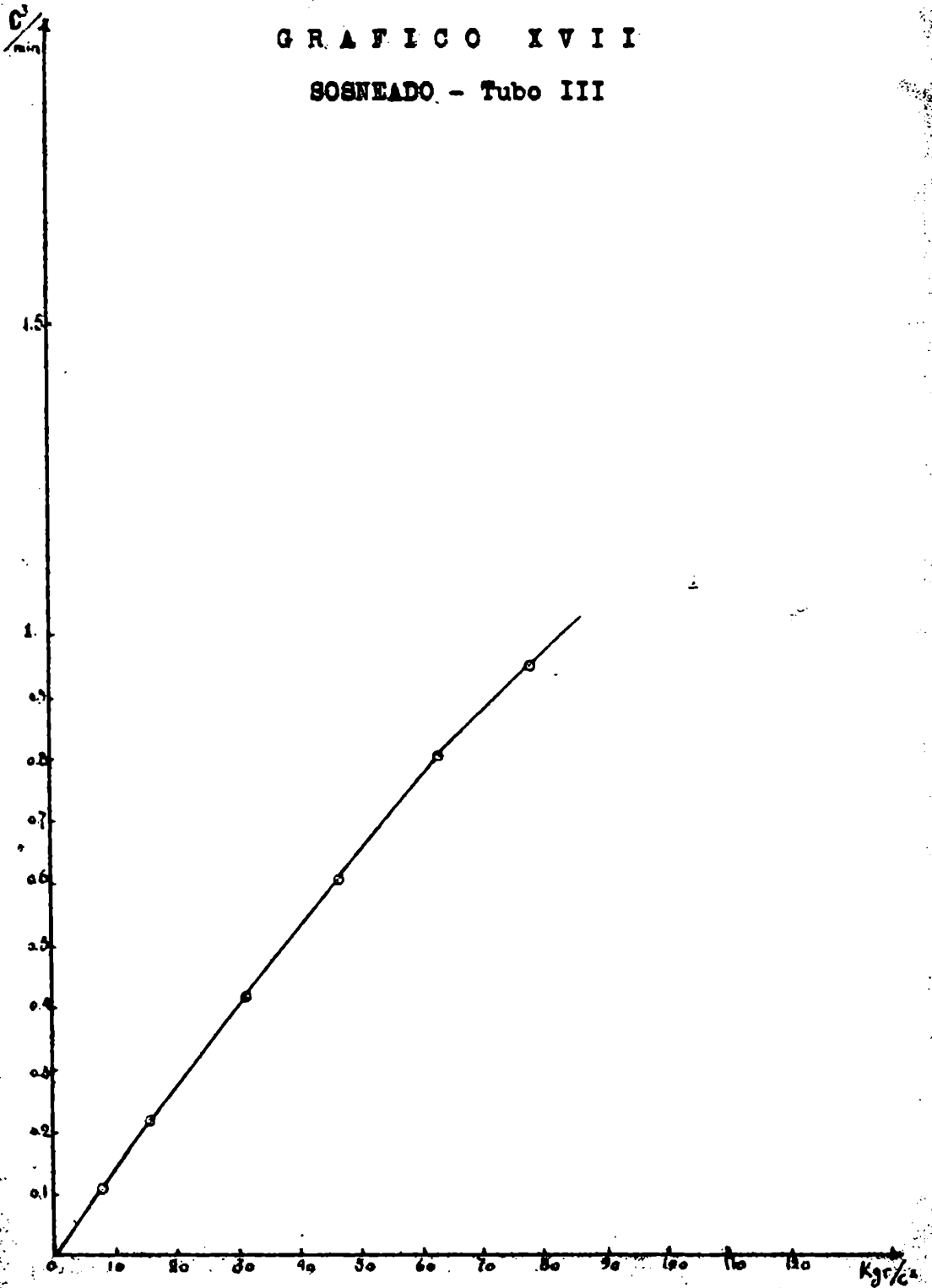


GRAFICO XVII

SOSNEADO - Tubo III



Donde:

P.- Presión

R.- Radio del tubo

L.- Longitud del tubo.

Para que el esfuerzo de corte en el tubo II sea el mismo que en el tubo III

$$P_{II} \frac{R_{II}}{2L_{II}} = P_{III} \frac{R_{III}}{2L_{III}}$$

De donde:

$$P_{II} \frac{R_{III} L_{II}}{R_{II} L_{III}} = P_{III}$$

$$\frac{R_{III} L_{II}}{R_{II} L_{III}} = 0,772$$

Es decir que comparando la viscosidad obtenida con el tubo II, a la presión P_{II} con la obtenida con el III a la presión $P_{III} = 0,772 P_{II}$, la haremos al mismo esfuerzo de corte. En la tabla XXI se consignan los datos de la tabla XIX y los correspondientes al mismo esfuerzo de corte por interpolación de los datos de la tabla XX.

Esfuerzo de corte	Viscosidad	Viscosidad
kg/cm ²	poises.10 ⁶	poises.10 ⁶
	Tubo II	Tubo III
77,2	3,59	3,35
154,4	4,12	4,09
231,6	4,25	4,25
308,8	4,46	4,46
386,6	4,63	4,64
463,2	4,84	

BIBLIOGRAFIA

- (1)(22) Howink R. Elasticity-Plasticity and Structure of matter 1940
 (1) p. 41
 (22) p. 145 Tabla 11.
- (2)(21) Andrade E.M. Da C. Nature 125-349-1930
- (7)(13)(14)(20) Bingham E.C. Fluidity and Plasticity 1922
 (3) p. 33
 (13) p. 6
 (20) p. 77
- (14) Hatschek E. The viscosity of liquids 1928
- (4)(5)(6)(11) American Society for Testing Materials 1942 Part. II
 (4) p. 480 Float test for bituminous materials
 (5) p. 488 Softening point of bituminous materials
 (6) p. 487 Penetration of bituminous materials
 (11) p. 466 Ductility of bituminous materials
- (5')(12) Saal R.N.J. y Koens G. Journal Inst. Petrol 19-208-1933
- (7)(10) Will C.C. and Harrison V.G.W. Journal Soc. of Chemical Industry 59-1940
- (9) Mack Ch. Journal Soc. of Chemical Industry 58-206-1938
- (15) Pochettino A. Nuovo Cimento 9-77-1914
- (16) Traxler H.N. Industrial and Engineering Chemistry 30-223-1938
- (17) Goodeve C.F. and Whitfield G.W. Trans. of Farad. Societ. 34-511-1938
- (18) Dictionary of Applied Physics vol. III Metrology and Measuring apparatus
- (19) Erk S. y Schmidt Physikalixh Zeitschrift 14-1937
- (22) Andrade E.M. Da C. Nature 125-580-1930

CONCLUSIONES

- I.- Se ha hecho una revisión crítica de los métodos empíricos que se utilizan en la técnica para la identificación y control de betunes asfálticos.
- II.- Se ha realizado un resumen de los métodos con fundamento científico para la medición de viscosidad de materiales de gran frotamiento interno.
- III.- Se propone un dispositivo simple para medir viscosidades absolutas de líquidos de 10^4 a 10^6 poises, basado en el escurrimiento por tubos capilares, pero usando presiones hasta 100 kg/cm^2 y tubos de 3 a 5 mm. de diámetro.
- IV.- Se discuten los errores sistemáticos y accidentales de todas las magnitudes que intervienen en la fórmula de Poiseuille, estableciéndose un error total del orden del 1 a 2%.
- V.- Se ha aplicado el dispositivo propuesto al estudio de betunes asfálticos de diversos orígenes, obteniéndose curvas de caudal-presión características para cada material, lo que permitiría usar este método para caracterizar y controlar materiales de alta viscosidad con grandes ventajas sobre los que se usan actualmente en la técnica.
- VI.- Se ha estudiado la variación de la viscosidad con la temperatura, comprobándose la validez de la fórmula de Andrade para líquidos normales.
- VII.- Se ha estudiado experimentalmente la fórmula de Poiseuille, comprobándose su validez para tubos de las dimensiones utilizadas.