

Estudio Experimental de la Lubricación Límite de los Aceites sobre los Metales Antifricción

POR

FRANCISCO JAVIER SITGES MENENDEZ

INTRODUCCION

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA LUBRICACION

Las dos leyes fundamentales sobre la fricción fueron expuestas por el ingeniero francés Amontons en 1699, que produjeron sorpresa y exceptismo en la Academia de Ciencias de París. La primera de estas leyes establece, que la fricción es independiente del área de contacto entre los dos sólidos que se mueven uno con respecto al otro. Y la segunda, que la fricción es proporcional a la fuerza o carga que actúa sobre ellos.

Las observaciones de Amontons (1) fueron confirmadas años después por Coulomb (2), quien llegó a hacer una distinción clara entre la "fricción estática" y la "fricción dinámica", la primera definida como la fuerza tangencial necesaria para que comience el deslizamiento relativo entre los dos cuerpos, y la segunda, como la fuerza indispensable para mantenerlo. Demostrando que la fricción dinámica tiene valores notablemente inferiores a los de la fricción estática.

Investigaciones realizadas hace algunos años (3) pusieron de manifiesto, que aún las superficies más cuidadosamente preparadas presentan rugosidades cuyos altibajos tienen dimensiones mayores que las moleculares. Las superficies sólidas solo se tocarán en los vértices de las rugosidades, así que el área de contacto íntimo será muy pequeño. El área real de contacto, será en efecto, independiente del tamaño de las dos superficies sólidas, quedando únicamente determinada por la carga, pues al producirse una deformación plástica en los puntos localizados de contacto bajo una presión intensa, se formará el área suficiente para soportar la carga. Por otra parte, al tener lugar el deslizamiento, la presión será sobre una superficie pequeña, elevándose mucho la temperatura en los puntos de contacto de las rugosidades. Los métodos experimentales, ponen en evidencia, que incluso para velocidades relativas de deslizamiento moderadas, las temperaturas alcanzadas por las superficies de los dos sólidos son lo suficientemente altas para producir los reblandecimientos o fusiones locales en los contactos, quedando éstos soldados. Por consiguiente, la fuerza de fricción, será una medida de la fuerza necesaria para cortar estas uniones. Observaciones, que explican las clásicas leyes de la fricción de Amontons, puesto que el área donde se han formado las soldaduras será independiente del área aparente total de las superficies que se deslizan, resultando sólo proporcional a la carga.

Cuando el frotamiento entre las dos superficies se realiza a través de una capa lubricadora, podrán producirse los dos casos siguientes:

a) Que la capa lubricante que separa ambas superficies, tenga espesor suficiente, para que la resistencia a la fricción sea determinable por las propiedades hidrodinámicas del líquido. Este tipo de lubricación es conocido con las denominaciones de "lubricación hidrodinámica", "lubricación viscosa" o "lubricación fluida", dándose entonces los valores mínimos para

el coeficiente de fricción. Los principios hidrodinámicos de esta lubricación fueron establecidos por O. Reynolds (4), en los que la viscosidad del líquido es la causa principal del frotamiento. Esta lubricación ideal, requiere una capa de lubricante con espesor suficiente entre las dos superficies metálicas, para que éstas no puedan entrar en contacto, evitando el desgaste de las mismas. Razón por la cual, la viscosidad de lubricante deberá de tener un valor tal, que para una separación dada entre las dos superficies, la capa continua de lubricante no se rompa.

b) Cuando las dos superficies deslizantes sólo quedan separadas por una delgada capa de lubricante, con un espesor comparable al de varios diámetros moleculares, se tiene la llamada "lubricación límite", y contrariamente al caso anterior, aquí la viscosidad no influirá nada o casi nada, al no poder realizarse las condiciones del frotamiento hidrodinámico, dependiendo entonces la fricción de la naturaleza de las superficies y de la constitución química del lubricante. Este tipo de lubricación, fué investigado por Hardy (5) quien le dió esta denominación; los alemanes le llaman "Grenzschmierung", los franceses "lubrification onctueuse" y los ingleses la conocen con el nombre técnico de "oiliness".

La transformación de la lubricación hidrodinámica a la límite puede ser gradual. Si disminuye la velocidad relativa de deslizamiento y también crece la carga, la capa de lubricante se vuelve cada vez más delgada, disminuyendo la lubricación hidrodinámica al mismo tiempo que aumenta la límite, pudiendo darse un tipo intermedio de lubricación mixta o "semifluida".

La lubricación límite tiene gran importancia en los mecanismos, ya que en los momentos de arranque y de parada, la velocidad es muy pequeña para asegurar la presión hidrodinámica, aumentando entonces el coeficiente de fricción con la ruptura de la capa de lubricación fluida, siendo interesante

conocer estas condiciones bajo las cuales comienzan a producirse los desgastes de las superficies metálicas. Marcelin (6), considera dos zonas de engrase límite para capas con espesores inferiores a 1 micra; una en la que el frotamiento es mayor que el hidrodinámico, sin desgaste metálico, y otra que correspondería a la capa adsorbida por la superficie metálica, donde el coeficiente de frotamiento sería mayor todavía, y en la que habría desgaste metálico.

No obstante, estas hipótesis de trabajo han sido aclaradas ultimamente con el empleo de metales radioactivos (7) y otros métodos físicos sensibles (8) que muestran en general, una penetración de lubricante en la superficie metálica con la consecuente adhesión. También se ha visto, que la lubricación de metales por ácidos grasos es más efectiva cuando los ácidos reaccionan con el metal para formar jabones. El ataque del metal tiene lugar mediante la capa superficial de óxido, así que los metales inertes o los metales que estén libres de óxido no podrán lubricarse eficazmente con los ácidos grasos. Respecto de la adhesión lateral metálica, ésta toma valores muy altos cuando el lubricante forma el jabón, al mismo tiempo que queda protegida contra la elevación de la temperatura, pues el punto de reblandecimiento del jabón es mucho más alto que el de fusión del ácido graso.

Como resumen, indicamos esquemáticamente en el cuadro adjunto el comportamiento de los tipos de lubricación citados.

TABLA I

Tipo de lubricación	Coefficiente de fricción	Desgaste
Superficie sin lubricar	prox. 1	Mucho
Lubricación flúida	prox. 0,001	Ninguno
Lubricación límite	0,05 a 0,15	Ligero

TEORIA DE LA EXTENSION DE UN LIQUIDO SOBRE UN SOLIDO

Al depositar una gota de un líquido sobre la superficie plana y horizontal de un sólido, podrá suceder que la gota forme con el sólido un "ángulo de contacto" θ finito, extendiéndose sobre el sólido hasta ocupar un área limitada. O que la gota se extienda completamente sobre el sólido, formando una lámina, en cuyo caso el ángulo θ será nulo.

Así, la gota del líquido A depositada sobre la superficie del sólido B, también formará sistema con el vapor G del líquido, apareciendo tres fases con tres superficies de contacto: vapor/líquido, vapor/sólido y líquido/sólido (Fig. 1).

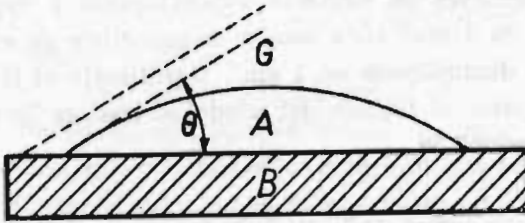


Figura- 1

Al extenderse espontáneamente la gota sobre el sólido, la "energía libre" del sistema disminuirá, y razonando para 1 cm^2 de extensión de gota, tendremos; representando las tensiones superficiales del líquido y del sólido respecto del vapor por σ_A y σ_B respectivamente y por $\sigma_{A,B}$ a la tensión interfacial entre el líquido y el sólido, que la disminución de la energía libre del sistema corresponderá a los tres términos siguientes: el aumento de 1 cm^2 de superficie entre el líquido y el sólido produce el incremento de energía potencial $\sigma_{A,B}$ el crecimiento de $1 \text{ cm}^2 \cos \theta$ entre el líquido y el vapor da lugar al aumento de energía potencial $\sigma_A \cos \theta$, y la disminución de 1 cm^2 entre el vapor y el sólido hace que la energía potencial disminuya

de σ_B . Como en el equilibrio del sistema, la energía debe de permanecer constante, se verificará que:

$$\sigma_{AB} + \sigma_A \cos \theta - \sigma_B = 0$$

de donde

$$\cos \theta = \frac{\sigma_B - \sigma_{AB}}{\sigma_A} \quad (1)$$

Si $\sigma_B > \sigma_{AB}$ entonces $\cos \theta > 0$ y θ será menor que 90° . Caso del líquido que moja al sólido. Pero, si $\sigma_B < \sigma_{AB}$, entonces $\cos \theta < 0$ y θ será mayor que 90° . Caso del líquido que no moja al sólido (p. e. para el mercurio sobre el vidrio $\theta = 140^\circ$).

El trabajo que se necesitaría suministrar al sistema para que las superficies de contacto vapor/líquido y vapor/sólido, aumentarían en 1 cm^2 cada una y la superficie de contacto líquido/sólido disminuyese en 1 cm^2 , significaría el trabajo preciso para separar el líquido del sólido, el cual es llamado "trabajo de adhesión" W_{AB} :

$$W_{AB} = \sigma_A + \sigma_B - \sigma_{AB} \quad (2)$$

Esta relación que expresa el aumento de la energía potencial por cm^2 , es la denominada "ecuación de Dupré" (9).

De las ecuaciones (1) y (2) se deduce el valor de la "energía de adhesión" entre el sólido y el líquido:

$$W_{AB} = \sigma_A (1 + \cos \theta) \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que la "energía de cohesión" del líquido vale $2\sigma_A$, evidentemente, mientras el ángulo de contacto θ tenga un valor finito se verificará la desigualdad $2\sigma_A > \sigma_A (1 + \cos \theta)$, y la gota ocupará sobre el sólido un área limitada. Pero, cuando en el equilibrio del sistema sean iguales las energías de cohesión y adhesión, la extensión de la gota será total, aca-

bando por formar una lámina sobre el sólido, y de acuerdo con la ecuación anterior habrá de anularse el ángulo de contacto.

Según Harkins (10) la energía de adhesión $\sigma_A (1 + \cos \theta)$, tre el sólido y el líquido, suele ser muy inferior comparada con la energía de adsorción del sólido para el vapor saturado del líquido. Por otra parte, $\sigma_A \cos \theta$ representará la "tensión de adhesión" del líquido, o también, su fuerza capilar respecto del sólido.

De acuerdo con los experimentos de Hardy y Nottage (11), cuando se lubrica una superficie metálica solamente con una lámina monomolecular de ácido graso, la fricción va disminuyendo a medida que crece el grupo CH_2 en la molécula, permaneciendo en este caso constante la fricción para grandes variaciones de temperatura, lo cual pone en evidencia que los extremos activos de las moléculas polares están firmemente ligados a la superficie metálica.

La hipótesis de Hersey (12) al tratar el fenómeno de la lubricación límite, es que aunque indudablemente, éste es debido a la lámina de moléculas orientadas sobre la superficie metálica, el campo de fuerzas de la superficie se extiende más allá de la primera lámina monomolecular, alcanzando a varias láminas moleculares, siendo de sumo interés el conocimiento de la *energía de adhesión* entre el sólido y el líquido.

ALEACIONES PARA COJINETES

Los cojinetes, son piezas metálicas diseñadas para soportar a través de una capa de aceite un eje que gira. Suponiendo que la lubricación es flúida, se mantendrá continua la capa de aceite, no pudiendo entrar en contacto las superficies metálicas del cojinete y del eje, y por lo tanto, se evitará el desgaste de ambas superficies. Sin embargo, en la práctica, debido a las inevitables variaciones de la velocidad de rotación del eje, aparecen las vibraciones que rompen la capa de aceite dejando so-

lamente una delgada lámina límite de lubricante, produciéndose entonces los contactos entre las dos superficies metálicas con el desgaste consiguiente.

De acuerdo con Bowden y Taylor (13), un factor de gran importancia que hay que tener en cuenta es la temperatura de las superficies, pues al entrar en contacto el eje con el cojinete, el calor desprendido por la fricción, puede producir reblandecimientos o fusiones localizadas en aquellos puntos en que los metales entraron en contacto. Lo cual explica, la conveniencia de que uno de los metales constituyentes de la aleación del cojinete tenga un punto de fusión relativamente bajo, pues de venir un calentamiento excesivo, podría fundirse así fácilmente el metal, evitando el efecto de mordaza. Por este motivo, la mayoría de las aleaciones para cojinetes contienen plomo (p. f. 327°C) o estaño (p. f. 232°C) y también otros componentes de punto de fusión bajo.

Entre las teorías propuestas para explicar el mecanismo estructural de las aleaciones de los cojinetes, una de las que prevaleció hasta hace poco tiempo, fué la de la "estructura doble", consistente en una fase de cristales duros embebidos en una matriz blanda (14). La función de los cristales duros sería resistir el desgaste, y la de la matriz blanda favorecer la distribución uniforme de la carga, así como también, los pequeños poros que se fueran formando en ella servirían para depositar el aceite lubricante. Aunque es cierto que muchas aleaciones de cojinetes poseen estructuras de este tipo, como las aleaciones de matriz blanda a base de plomo y de estaño, sin embargo, recientemente se ha demostrado que esta teoría no es satisfactoria, al quedar en evidencia que los cristales duros de las aleaciones de los cojinetes influyen muy poco en las propiedades de la fricción.

Bastantes aleaciones modernas no presentan en la superficie la estructura doble, formando solamente una fase; y en otros aparece en la superficie, invertida la estructura doble, con una

matriz de metal duro en la que está dispersada una pequeña cantidad de metal blando. Por ejemplo, algunas aleaciones de cobre-plomo prueban lo que se acaba de decir, el cobre duro forma la fase continua en la que se halla finamente depositado el plomo.

ACEITES LUBRICANTES

Las propiedades físicas de un aceite lubricante mineral dependen de tres características generales: del crudo de petróleo de que procede, del método y extensión del refino, y del tratamiento aditivo. Pero debido a los numerosos crudos utilizados, a los muchos procesos de refino y a la variedad de aditivos empleados, la posibilidad de combinaciones que existen hoy día en la producción de tipos diferentes de aceites lubricantes es enormemente grande.

Como ya es sabido, los aceites procedentes de crudos de petróleo son mezclas muy complejas de muchos hidrocarburos con estructuras moleculares diferentes. En América, ya hace años que los crudos se clasifican comercialmente en tres tipos, atendiendo exclusivamente a las proporciones dominantes de los hidrocarburos constituyentes: base parafina (Pensilvania), base nafteno o base asfalto (Costa del Oeste) y base mixta (América Central). En la práctica, las pruebas específicas para caracterizar un aceite suelen referirse a las normales del tipo de crudo de donde procede. Así, los aceites parafínicos poseen índices de viscosidad altos, mientras que los aceites nafténicos los tienen bajos (15).

Respecto a la composición química de los aceites minerales, se ha comprobado que los hidrocarburos constituyentes tienen entre 20 y 70 o más átomos de carbono por molécula, con pesos moleculares entre 250 y 1.000, lo que da una idea de la complejidad de estas estructuras; mediante un cálculo sencillo hallaríamos muchos millones de posibilidades para combinar áto-

mos de carbono con átomos de hidrógeno en esta clase de moléculas. No obstante, toda esta complejidad ha sido resuelta por la investigación, habiéndose llegado después de gran número de estudios sobre la composición de los aceites lubricantes, a resultados que permiten teorizar con exactitud sobre los tipos generales de las moléculas de hidrocarburos que forman los aceites (16). La clasificación química de los aceites lubricantes del petróleo aceptada actualmente es la que sigue:

(1) *Parafinas de cadena normal*.—Son fracciones de aceite procedentes de las ceras parafínicas con un punto de fusión relativamente alto.

(2) *Parafinas de cadena ramificada*.—a) De cadena principal larga y cadenas ramificadas cortas, son aceites muy parecidos a los de la clase anterior. b) De cadena principal con ramificaciones de cadena largas. Estos aceites tienen índices de viscosidad altos, tensiones de vapor muy bajas y gran estabilidad, siendo muy apreciados como lubricantes.

(3) *Naftenos*.—a) Con pocos anillos por molécula y preponderancia de enlaces parafínicos de cadena larga, sus propiedades físicas son parecidas a las de la clase 2 (b). b) Naftenos con un gran número de anillos por molécula y con cadenas cortas de parafina laterales, presentando índices de viscosidad bajos.

(4) *Aromáticos*.—Son hidrocarburos con estructuras de anillos sin saturar, tales como benceno, nafteno, fenantreno, etc., se comportan como los alquil-aromáticos con tendencia a la oxidación y con índices de viscosidad bajos. Los asfaltos y resinas de esta clase probablemente contienen aromáticos condensados con numerosos anillos fundidos. Estos aceites lubricantes se consideran de mala calidad.

(5) *Mixtos de parafina-naftenos-aromáticos*.—a) Moléculas conteniendo sólo unos pocos anillos aromáticos, combinados preponderadamente con anillos de nafteno y cadenas de parafina. Se comportan de manera análoga a los naftenos. b) Tipos que

tienen más de dos o tres anillos aromáticos combinados con pocos anillos de nafteno y cadenas de parafina, con propiedades muy parecidas a los aromáticos.

A los aceites lubricantes se les suelen agregar sustancias aditivas con el fin de mejorar la calidad de la base mineral del aceite, atendiendo a una o varias características determinadas, como son: protección a la corrosión del cojinete, detergencia y dispersión, mejora del índice de viscosidad, antiespuma, antienranciamiento, untuosidad, color, etc. La acción de los aditivos sobre los aceites no ha sido estudiada científicamente, pero la gran importancia de los mismos queda reflejada a través de los millares de patentes que los amparan. Pritzker (17) dice lo siguiente: en algunos casos, se ha llegado a la conclusión que la presencia del aditivo tiene más interés que el mismo aceite.

El gran volumen de consumo de aceites lubricantes para toda clase de máquinas y motores que existen desde hace ya algunos años, ha dado lugar a clasificaciones comerciales propuestas por las comisiones técnicas respectivas. Desde el año 1926, las asociaciones "Society of Automotive Engineers" y "Automotive Manufacturers" adoptaron una clasificación arbitraria de los aceites para motores, atendiendo exclusivamente a los valores de la viscosidad (18), y sin tener en cuenta otras propiedades y características de los aceites.

TABLA II

N.º de viscosidad S. A. E.	Valores de viscosidades Saybolt			
	a 130° F		a 210° F	
	Min.	Max.	Min.	Max.
10	90	120	—	—
20	120	185	—	—
30	185	255	—	—
40	255	—	—	80
50	—	—	80	105
60	—	—	105	125
70	—	—	125	150

La asociación de "Automotive Manufacturers" ha recomendado que a la clasificación S A E de la tabla II se le agregue los tipos de aceite de invierno 10 W y 20 W.

TABLA III

N.º de viscosidad	Valores de viscosidades Saybolt a 0° F	
	Min.	Max.
10 W	6.000	12.000
20 W	12.000	48.000

Debido a que esta clasificación de los aceites por su viscosidad no es suficiente para caracterizarlos totalmente, puesto que existen otras propiedades físicas de las que también depende la calidad de lubricación, a partir de 1945 el "Lubrication Committee, Division of Marketing of the American Petroleum Institute" acordó definir tres tipos (19):

Regular Type.—Aceite de motor con propiedades adecuadas para emplearlo en motores de combustión interna y en máquinas de exigencias moderadas.

Premium Type.—Con esta denominación se conocen los aceites de motor estables a la oxidación y anticorrosivos para los cojinetes, convenientes para motores de combustión interna con exigencias mayores que los del tipo anterior.

Heavy Duty Type.—Son aceites de motor estables a la oxidación y con propiedades anticorrosivas y detergente-dispersantes, indicados para motores diesel y de gasolina de altas velocidades y con condiciones de servicio exigentes.

PARTE EXPERIMENTAL

Hemos orientado esta memoria, a la determinación del comportamiento lubricante de los aceites minerales sobre las aleaciones metálicas de los cojinetes. Para ello, se eligieron aceites

de tipos diferentes, empleados de ordinario en los motores de combustión interna, tomando como patrón el aceite neutro de parafina; así como, muestras de los metales de cojinetes más conocidos comercialmente, incluyendo tres aleaciones a base de cinc, denominadas "Zamak".

La marcha experimental queda resumida en los apartados siguientes, que aparecerán más adelante detallando el proceso y los resultados obtenidos al final de cada uno.

Medida de las densidades de los aceites lubricantes.—Fueron realizadas por el método del "frasco de Weld" a las temperaturas de 25° C., 50° C. y 100° C., con cuyos valores se trazaron las gráficas y se calcularon las ecuaciones de la variación térmica. Estas medidas encabezan todos los experimentos, por ser indispensables en el cálculo de varias de las fórmulas que han de emplearse luego.

Determinación de las viscosidades de los aceites lubricantes.—Se hicieron con el viscosímetro de "Höeppler" a la temperatura de 25° C., con el fin de clasificar los diversos aceites por el orden de sus viscosidades.

Determinación de los pesos moleculares medios de los aceites lubricantes por el método ebulloscópico.—Con el aparato de Mc Coy se obtuvieron los pesos moleculares medios, valores muy eficaces que suelen emplearse para caracterizar las estructuras moleculares de los crudos de petróleo. En este trabajo, son indispensables para calcular los diámetros moleculares medios de los aceites lubricantes.

Medidas realizadas con el aparato de Richard von Dallwitz-Wegner.—Aparato que permite, por elevación en tubo capilar, hallar los valores de los ángulos de contacto de los diferentes aceites lubricantes con cada uno de los metales de los cojinetes respecto de una probeta de acero. Valores utilizados luego por nosotros, para calcular las "energías de adhesión" entre el aceite y el metal.

Tensímetro de lectura directa de Lecomte de Noüy.—Utili-

zado para medir las tensiones superficiales de los aceites a diferentes temperaturas (entre unos 20° C y 100° C.). Con cuyos valores se trazaron las gráficas de la tensión superficial y de la energía superficial molar, para obtener gráficamente el valor de la constante de Eötvös de cada aceite. Empleando a continuación su valor, para calcular con las fórmulas de Espurz la tensión superficial activa y el diámetro molecular medio del aceite.

Determinaciones de las presiones de vapor y de los calores de vaporización de los aceites.—Dada la pequeñez de las tensiones de vapor de los aceites, se ha seguido el “método del transporte” a las temperaturas de 50° C. y de 80° C., donde extrapolando las relaciones de la masa de vapor de aceite transportado por el volumen de aire seco para un tiempo infinito, se hallaron en fracciones de atmósfera las pequeñísimas presiones de vapor a estas dos temperaturas.

Una vez obtenidos estos valores, se aplicó la ecuación de Clausius-Clapeyron (20) para calcular el valor molar de vaporización medio a la temperatura de 65° C.

Finalmente, mediante la ecuación de Jones y Bowden, se calculó la constante que figura en ella, y que relaciona el calor de vaporización con la densidad del aceite. Así, fueron hallados los calores molares de vaporización de los aceites a diferentes temperaturas que constan en las tablas, indispensables para calcular con la fórmula de Espurz los diámetros moleculares.

Fotomicrografías de las aleaciones de cojinetes.—Estas se obtuvieron con un equipo metalográfico “Reichert”, empleando las mismas probetas metálicas de los cojinetes, que fueron utilizadas antes en la medida de los ángulos de contacto respectivos de los diferentes aceites lubricantes. Las probetas se sometieron a la preparación necesaria, para lograr una superficie satisfactoria con arreglo a las normas metalográficas conocidas.

MEDIDA DE LAS DENSIDADES DE LOS ACEITES LUBRICANTES

Para medir las densidades de los aceites lubricantes seguimos el método del "frasco de Weld" (21). Este picnómetro es un frasco de vidrio "Pyrex" de 50 c. c., al cual se le adapta un tapón taladrado del mismo vidrio que ajusta perfectamente a esmeril, y que tiene una señal para marcar el volumen del líquido.

En primer lugar, se pesa el picnómetro vacío y seco. Después se llena de aceite valiéndose de una pipeta, y se adapta el tapón de modo que no queden burbujas; se introdujo inmediatamente en el baño del "ultratermostato Bühler", esperando a que el picnómetro tome la temperatura del baño, chupando con un poco de papel de filtro el exceso de aceite, hasta enrasar con la señal. Luego se limpia con un paño, dejándolo media hora en la caja de la balanza para que adquiera la temperatura del ambiente, y se pesa.

Después se vacía el picnómetro y se desengrasa con solución de sosa, benzol, y éter, lavándolo seguidamente varias veces con agua destilada. Se llena por último, con éste líquido, y teniendo en cuenta las mismas precauciones que anteriormente, se pesa un volumen de agua destilada igual al del aceite y a la misma temperatura.

El valor de la densidad de los aceites, corregido del empuje del aire, se halla mediante la fórmula:

$$\rho = \frac{m \rho_a}{m_a} - \frac{0,0012 (m - m_a)}{m_a} \quad (4)$$

donde m y m_a son los pesos del aceite y del agua a la temperatura t , y ρ la densidad del agua a esa temperatura.

RESULTADOS OBTENIDOS

Las densidades de los distintos aceites lubricantes fueron halladas a 25.° C., 50.° C. y 100.° C., siguiendo el método anteriormente descrito, habiendo sido utilizada para las pesadas una balanza semimicro (Mettler). Se obtuvieron así para cada aceite, tres valores de la densidad a las temperaturas indicadas. Con estos valores se construyó la gráfica adjunta, tomando en abscisas temperaturas, y en ordenadas densidades, resultando líneas rectas como era de esperar.

TABLA IV

DENSIDADES DE LOS DISTINTOS ACEITES LUBRICANTES A 25.° C., 50.° C. Y 100.° C.

	DENSIDADES		
	25° C.	50° C.	100° C.
ACEITE NEUTRO	0,8685	0,8528	0,8216
SAE 10	0,9056	0,8894	0,8575
SAE 20	0,8786	0,8630	0,8314
SAE 30	0,8909	0,8752	0,8444
SAE 40	0,8881	0,8726	0,8419
SAE 50	0,9203	0,9048	0,8736
SAE 60	0,8915	0,8752	0,8447
SAE 70	0,8973	0,8820	0,8518

Por razones de precisión, para obtener el valor de la densidad a una temperatura cualquiera, dentro del intervalo térmico 25.° C. — 100.° C., que necesitaremos en otras partes de este trabajo, se calcularon a partir de estos valores las ecuaciones de los aceites lubricantes.

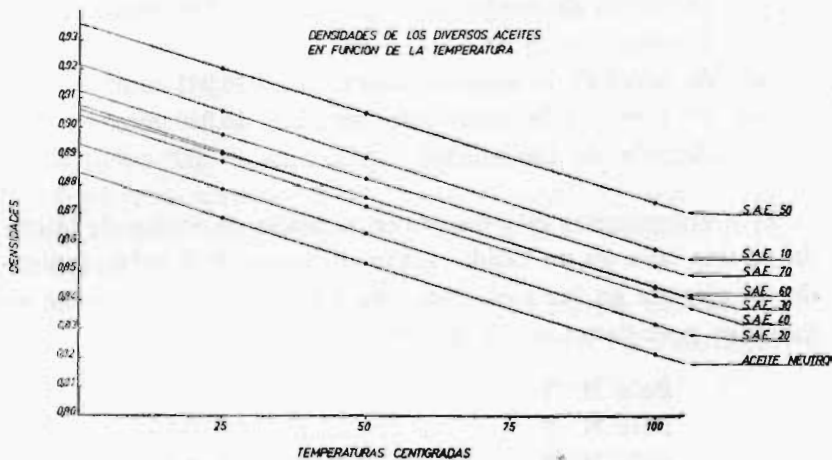


TABLA V

ECUACIONES DE LAS DENSIDADES DE LOS ACEITES

(ACEITE PARAFINA NEUTRO)	= - 0,000625 t + 0,8841
(SAE 10)	= - 0,00064 t + 0,9215
(SAE 20)	= - 0,00063 t + 0,8944
(SAE 30)	= - 0,000619 t + 0,9063
(SAE 40)	= - 0,000616 t + 0,9035
(SAE 50)	= - 0,000623 t + 0,9359
(SAE 60)	= - 0,00062 t + 0,9067
(SAE 70)	= - 0,000606 t + 0,9124

DETERMINACION DE LAS VISCOSIDADES
DE LOS ACEITES LUBRICANTES

Las medidas de las viscosidades de los aceites lubricantes empleados en estos experimentos fueron realizadas con un viscosímetro "Höeppler" n.º 6.670 BH (22). Cuyo tubo de vidrio calibrado por la casa constructora, tiene las características siguientes:

Distancia de caída	100 mm.
Diámetro interior	
a) Al nivel de la señal superior	15,941 mm.
b) Al nivel de la señal inferior	15,940 mm.
Angulo de inclinación	80°

Este viscosímetro está basado en la teoría de Stokes de la caída de una bola en un fluido. Lleva un juego de 6 bolas, teniendo un alcance en las mediciones de 0,5 a 80.000 cP. Con las siguientes precisiones en las medidas:

Bola N.º 1	+ 2 %
Bola N.º 2	+ 0,5%
Bola N.º 3	+ 0,5%
Bola N.º 4	+ 1,0%
Bola N.º 5	+ 1,0%
Bola N.º 6	+ 1,5%

El intervalo de a temperaturas es de -60.º C. a 150.º C.

Para calcular la viscosidad absoluta se emplea la fórmula reducida:

$$\eta = K (d_b - d_l) t \quad (5)$$

en la que

η = viscosidad absoluta en centipoises

K = Constante de la bola

d_b = densidad de la bola

d_l = densidad del líquido a la temperatura de medida

t = tiempo de caída de la bola en segundos

Tanto los valores de la constante K como de la densidad de la bola d_b constan en el certificado de ensayos del aparato.

La densidad de los aceites lubricantes fué hallada por el método del picnómetro, manteniendo la temperatura a 25.º C

con un ultratermostato, y las pesadas realizadas en una balanza semimicro.

La temperatura del viscosímetro también fué regulada con el ultratermostato con baño de agua destilada a 25.° C.

El tiempo de la caída de la bola, fué medido con un reloj contador que aprecia la centésima de segundo, tomándose la media de tres tiempos de cada, dada la gran precisión del instrumento.

Antes de cada medición se hizo una limpieza cuidadosa del tubo de caída y de las bolas, de acuerdo con las instrucciones que acompañan al instrumento (desengrase con una solución caliente de sosa a la que se agrega un 50% de amoníaco concentrado y lavado posterior con agua destilada y éter sulfúrico).

TABLA VI

ACEITE DE PARAFINA

Temperatura 25° C.

Bola N.º 3	K = 0,7582
Bola N.º 3	$d_b = 2,405 \text{ g/cc}$
Aceite.....	$d_l = 0,8685 \text{ g/cc}$
Tiempo medio.....	$t = 60,22 \text{ seg.}$
Viscosidad = 70,2 centipoise	

ACEITE S.A.E. 10

Temperatura 25° C.

Bola N.º 4.....	K = 5,284
Bola N.º 4	$d_b = 2,412 \text{ g/cc}$
Aceite.....	$d_l = 0,9058 \text{ g/cc}$
Tiempo medio.....	$t = 11,90 \text{ seg.}$
Viscosidad = 94,7 centipoise	

ACEITE S.A.E. 20

Temperatura 25° C.

Bola N.º 4..... K = 5,284
 Bola N.º 4..... $d_b = 2,412$ g/cc
 Aceite..... $d_f = 0,8687$ g/cc
 Tiempo medio..... t = 15,2 seg.
 Viscosidad = 122,3 centipoise

ACEITE S.A.E. 30

Temperatura 25° C.

Bola N.º 4..... K = 5,285
 Bola N.º 4..... $d_b = 2,412$ g/cc
 Aceite..... $d_f = 0,8909$ g/cc
 Tiempo medio..... t = 47,01 seg.
 Viscosidad = 297,4 centipoise

ACEITE S.A.E. 40

Temperatura 25° C.

Bola N.º 4..... K = 5,284
 Bola N.º 4..... $d_b = 2,412$ g/cc
 Aceite..... $d_f = 0,8881$ g/cc
 Tiempo medio..... t = 44,9 seg.
 Viscosidad = 361,6 centipoise

ACEITE S.A.E. 50

Temperatura 25° C.

Bola N.º 4..... K = 5,284
 Bola N.º 4..... $d_b = 2,412$ g/cc
 Aceite..... $d_f = 0,9203$ g/cc
 Tiempo medio..... t = 63,65 seg.
 Viscosidad = 501,8 centipoise

VISCOSIMETRO DE HOEPLER

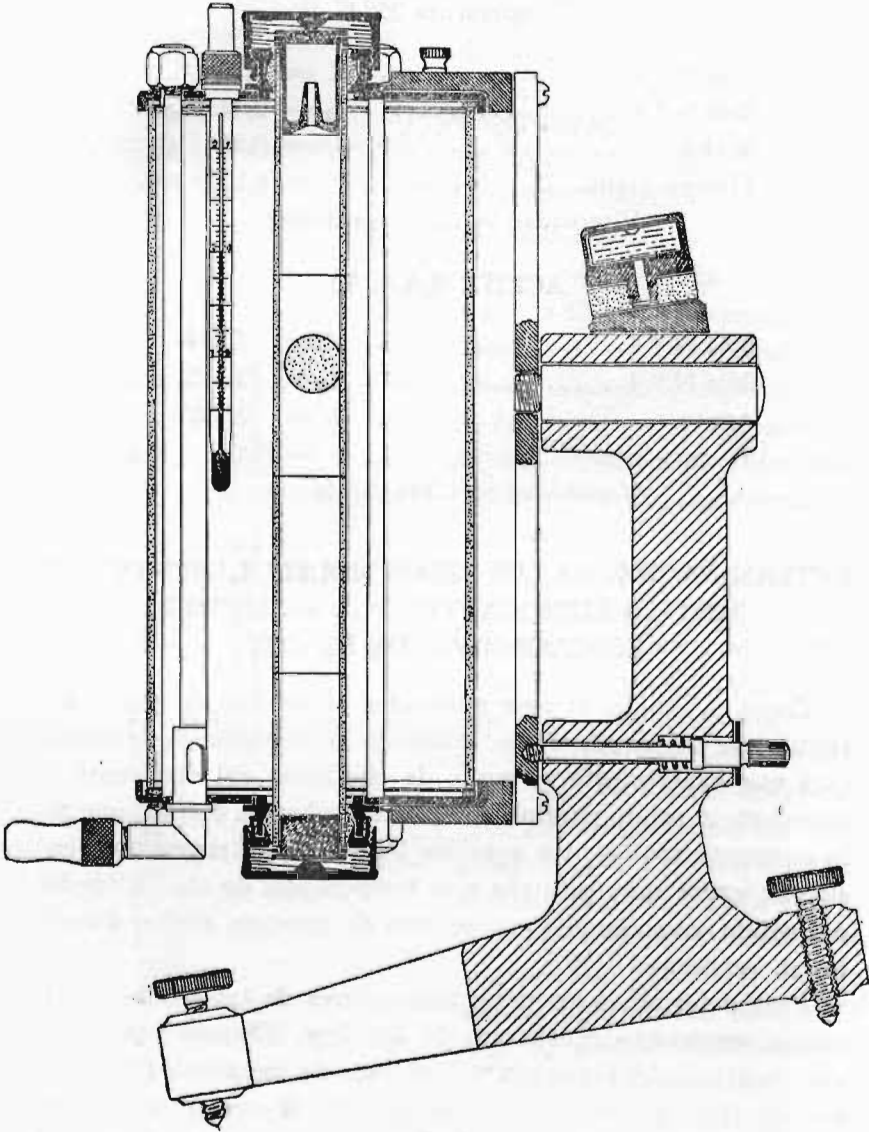


Fig. 2

ACEITE S.A.E. 60

Temperatura 25° C.

Bola N.º 4.....	K = 5,284
Bola N.º 4.....	d _b = 2,412 g/cc
Aceite.....	d _i = 0,8915 g/cc
Tiempo medio.....	t = 78,82 seg.
Viscosidad = 632,3 centipoise	

ACEITE S.A.E. 70

Bola N.º 4.....	K = 5,254
Bola N.º 4.....	d _b = 2,412 g/cc
Aceite.....	d _i = 0,8973 g/cc
Tiempo medio.....	t = 155,4 seg.
Viscosidad = 1.244 centipoise	

DETERMINACION DE LOS PESOS MOLECULARES DE LOS
ACEITES LUBRICANTES POR EL METODO
EBULLOSCOPIO DE Mc COY

Como es sabido, el peso molecular de un líquido puede determinarse por ebulloscopia, midiendo la elevación de temperatura que experimenta el punto de ebullición del disolvente al introducir el soluto para producir una disolución. Método que sólo es recomendable para aquellos líquidos que tengan una tensión de vapor muy pequeña a la temperatura de ebullición del disolvente, como sucede con el caso de nuestros aceites disueltos en benceno.

Para determinar los pesos moleculares de los aceites lubricantes empleamos el aparato de Mc Coy (23) que constituye una modificación mejorada del aparato de Bekmann (24). Este aparato (fig. 3) está formado por un tubo B, que sirve a la vez de matraz de ebullición de vapor. Dentro de él va colocado el tubo A, medidor de volúmenes, graduado desde 10 c.c. a 35 c.c.;

que comunica con el B a través de un tubo delgado, cuya misión es la de activar la ebullición del líquido contenido en A al

EBULLOSCOPIO DE MC COY

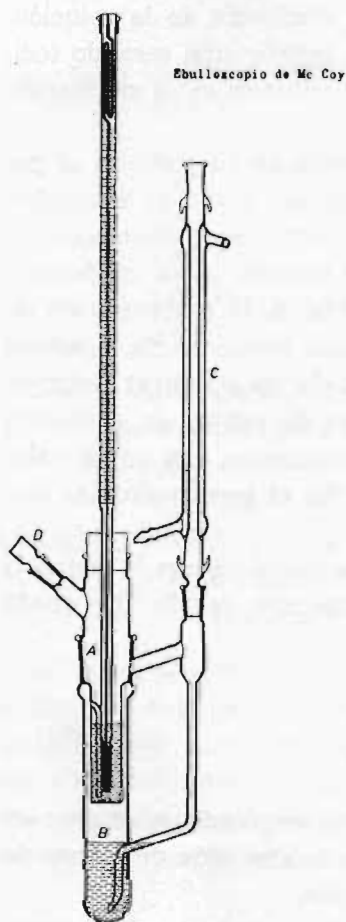


Fig. 3

pasar a través de éste el vapor del disolvente, formando burbujas. La boca del tubo A va cerrada con un tapón que soporta el termómetro Bekmann, y lateralmente conecta con el sistema de condensación C.

Se prepara el aparato echando unos 50 c. c. de benceno en el matraz B, en cuyo fondo hay unos trocitos de porcelana porosa para asegurar una buena ebullición, echando también unos 10 c. c. del mismo benceno en el tubo graduado A.

El vapor producido al hervir el benceno en el matraz B, se encarga de calentar al benceno —disolvente que se halla en el tubo A— burbujeando a través de él, y elevando su temperatura hasta el punto de ebullición. Entonces, será necesario regular el calentamiento eléctrico exterior, para lograr que el benceno contenido en A hierva con regularidad, al mismo tiempo que se obtiene una destilación muy lenta en el condensador.

Cuando el termómetro termina por registrar una temperatura constante se anota la lectura, que corresponderá al punto de ebullición del benceno.

Inmediatamente, se quita el tapón D, y con una pipeta adecuada, se introduce en el tubo A una masa conocida (por diferencia de pesadas) del aceite cuyo peso molecular vamos a determinar, repitiendo lo dicho anteriormente, hasta obtener la temperatura constante del punto de ebullición de la solución. Después, se eleva cuidadosamente el termómetro, sacando todo el depósito de la solución, y se lee su volumen en la graduación del tubo.

Colocando nuevamente el termómetro en su posición, se podrá realizar una nueva determinación del punto de ebullición de la solución por el mismo procedimiento que acabamos de indicar. Ahora bien, como el vapor del benceno se va condensando cada vez más en el interior del tubo A, la concentración de la solución irá disminuyendo, y como consecuencia, también disminuirán los puntos de ebullición de las sucesivas determinaciones, así que se obtendrán series de puntos de ebullición correspondientes a diferentes concentraciones, con cuyos valores se podrá calcular por extrapolación el peso molecular medio del aceite que actuó como soluto.

El peso molecular M del soluto se calculará con la conocida fórmula ebulloscópica, que para el aparato de Mc Coy queda reducida a:

$$M = K \frac{m}{ev} \quad (6)$$

Siendo K la constante el disolvente empleado, m el peso en gramos del líquido que se disuelve, e la elevación del punto de ebullición y v el volumen de la solución.

En la tabla adjunta damos los valores de los pesos moleculares medios de los aceites lubricantes, obtenidos a partir de tres determinaciones del punto de ebullición para cada aceite, valiendo la constante K del benceno 3280.

PESOS MOLECULARES MEDIOS DE LOS ACEITES
DETERMINADOS POR EBULLOSCOPIA
(APARATO Mc COY)

TABLA VII

ACEITE NEUTRO	M = 362
SAE 10	M = 310
SAE 20	M = 375
SAE 30	M = 422
SAE 40	M = 463
SAE 50	M = 409
SAE 60	M = 510
SAE 70	M = 616

NOTA. La discrepancia observada en el SAE 50 se explica por no proceder todos los aceites del mismo crudo de petróleo.

APARATO MEDIDOR DE LA LUBRICACION DE ACEITES
EN LOS COJINETES DEL DR. RICHARD
VON DALLWITZ — WEGNER

La resistencia de fricción W de cojinetes lubricados, no solamente depende de la *viscosidad* γ_1 de los lubricantes, sino que también juega un papel importante el llamado *poder de extensión* β del lubricante en contacto con las superficies metálicas, generalmente, un eje que gira apoyado en un cojinete, conforme con la ecuación propuesta por el autor:

$$W = C \frac{\gamma_1}{\varepsilon \beta} \text{ Kg.}$$

donde γ_1 es la viscosidad del lubricante, β el poder de extensión del mismo en relación con las superficies metálicas a lubricar, y C una constante que incluye el radio del eje, las velo-

tidades relativas de las partes metálicas separadas por la capa de lubricante, la carga sobre el cojinete, etc. Finalmente, ζ representada la *separación mínima* entre las dos superficies metálicas lubricadas que se deslizan una contra otra.

Si el intersticio ζ permaneciera constante, la fricción del cojinete sería proporcional a la viscosidad γ del lubricante, e inversamente proporcional al poder de extensión β . Sin embargo, habrá de tenerse en cuenta que el intersticio depende de la viscosidad del lubricante, así que un aumento de viscosidad trae, como consecuencia, un aumento del intersticio. Por otra parte, de acuerdo con la fórmula, el intersticio figura como un factor del poder de extensión β , aunque sin ser proporcional al valor de éste.

La importancia del poder de extensión, ha sido demostrada por el autor a través de numerosos experimentos, habiendo llegado a fijar en unas 10 dinas/cm. el valor mínimo del poder de extensión β de un líquido, para que pueda reunir las características de lubricante para cojinetes. Además, éste es un factor decisivo en el "rendimiento de la lubricación", o dicho de otra manera, en el empleo de la cantidad mínima de lubricante eficiente. Por ejemplo, en aquellas máquinas donde la lubricación no puede ser automática por circulación continua de aceite, se ha llegado a la conclusión que la cantidad de lubricante justamente necesario, es proporcional a la tercera potencia del poder de extensión β del lubricante aplicado. Evidentemente, un lubricante que tenga el doble del poder de extensión que otro, poseerá un rendimiento de lubricación ocho veces mayor que el último para el sistema estático de lubricación citado.

El siguiente sencillo experimento, permite determinar el valor del poder de extensión.

Al depositar una gota de aceite sobre un bloque de metal (Fig. 4), ésta tenderá a extenderse sobre la superficie metálica, adoptando finalmente su superficie libre la forma de un menisco convexo. La *tensión superficial* del aceite en contacto con el

aire, tenderá a darle la forma globular evitando su extensión total, pero a lo largo del círculo de contacto entre el aceite y el metal, la tensión superficial cambia de valor, dependiendo de las características particulares del aceite y del metal. Esta fuerza que tiende a extender el aceite en forma de una delgada

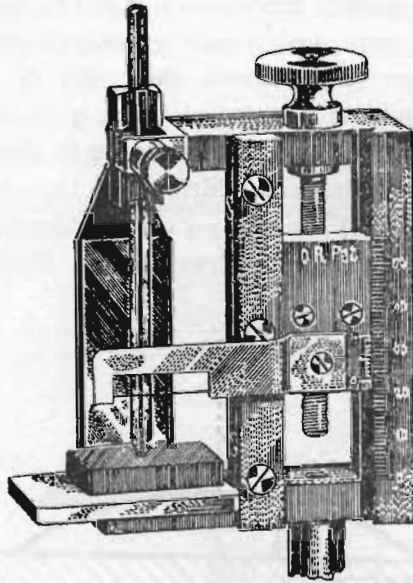


Fig. 4

película sobre la superficie metálica, es el llamado “poder de extensión β ”. En el caso de que β fuera mayor que α la tensión superficial del líquido sería incapaz de impedir la extensión total de éste sobre el metal, aplastándose la gota hasta formar una delgada película. Pero este fenómeno nunca se produce en el caso de la gota de aceite depositada sobre un metal; con estas dos sustancias, α es siempre mayor que β y como consecuencia aparece el “ángulo de contacto θ ” cuya abertura da el

valor relativo de la fuerza de extensión β respecto de la tensión superficial α de regresión globular:

$$\cos \theta = \frac{\beta}{\alpha} \quad (7)$$

El método de medida propuesto por el Dr. Richard von Dallwitz — Wegner, para determinar los valores de la tensión superficial α del aceite lubricante, del poder de extensión β , y del ángulo de contacto θ entre el aceite y el metal a ensayar, está fundado en el conocido fenómeno de la elevación de líquidos en los tubos capilares de vidrio (25).

El aparato (Fig. 5) consiste en un catetómetro de visión directa, que permite medir la elevación del líquido en un tubo

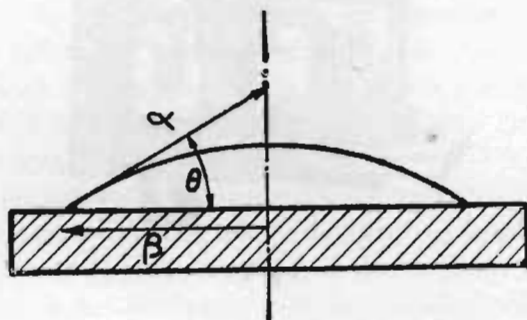


Fig. 5

capilar de vidrio, suprimiendo el error de paralaje en la medida mediante la coincidencia por reflexión sobre un espejo trasero de la imagen del hilo de enrase. Las lecturas se hacen en una escala vertical, desplazando el nonius de décimas de mm. con un tornillo.

Se prepara un bloque de metal o aleación del cojinete M que se pretende ensayar (aproximadamente de 0,50 cm. de espesor

por 3 cm. de largo y 1,5 cm. de ancho) cuya superficie se suaviza cuidadosamente —en las mismas condiciones que estaría el cojinete— procurando que esté perfectamente limpia de la película de óxido y de los vestigios de aceite. Sobre la superficie así preparada se deposita una gota de aceite, introduciendo entonces en su centro el extremo puntiagudo de un tubo capilar de vidrio, a continuación se hace subir el aceite en este capilar succionando hasta un nivel algo más alto del que alcanzaría por capilaridad, y al cabo de poco tiempo, habrá descendido hasta estabilizarse a la altura h_1 .

Si el diámetro interno del capilar es D cm., la fuerza capilar será $\pi D \alpha$ dinas, que soporta la columna de aceite ascendido, de peso $\frac{\pi D^2 h_1 \rho g}{4}$. De donde se obtiene inmediatamente el valor:

$$\alpha = \frac{Dg}{4} \rho h_1 \text{ dinas/cm.} \quad (8)$$

Así se obtiene el valor de la tensión superficial del aceite lubricante, por elevación en tubos capilares (fig. 6).

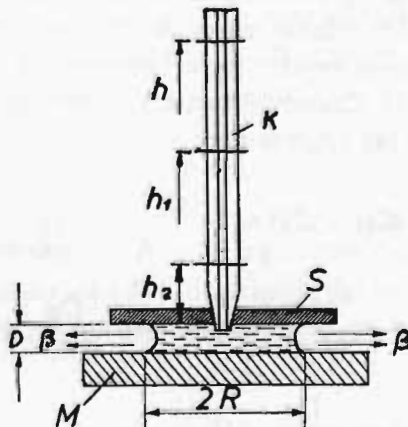


Fig. 6

Después de haber realizado esta medida, se retira el tubo capilar apartándolo de la gota de aceite, cuya operación no influye en la longitud de la columna de aceite que contiene el capilar, manteniéndose a altura h_1 . Se limpia y desengrasa cuidadosamente el bloque metálico, colocándolo de nuevo en su posición, y sobre él se coloca ahora el disco de succión S, construido con el metal del eje. Este va encajado en un anillo con tres pequeñas patitas sobre la superficie del bloque del metal, de manera que entre ésta y la parte inferior del disco, quede un espacio de 0,6 mm. El centro del disco está perforado, por cuyo agujero se introduce el extremo puntiagudo del tubo capilar. De este modo, el aceite contenido en el capilar tendrá contacto primeramente, con la superficie limpia del bloque del metal, y el poder de extensión β que buscamos, producirá su efecto entre el aceite y el metal, sacando aceite del capilar con la fuerza $\pi D \beta$, apareciendo entonces una gota de succión sobre el bloque; ésta, llenará rápidamente el anillo de succión, cuyo espacio hueco entre la superficie del bloque y la parte inferior del anillo, se irá llenando de aceite bajo la acción del poder de extensión β que se va a determinar (26).

Las dos fuerzas, es decir, la de tensión superficial que tiende a llenar el capilar, y esta última de extensión que tiende a vaciarlo por succión, estarán en equilibrio tan pronto como el nivel de aceite en el capilar haya retrocedido de la altura h_1 a la h_2 (Fig. 6). Cuando ésto tenga lugar, quedará expresado el equilibrio de las fuerzas por:

$$\pi D \alpha - \pi D \beta = \frac{\pi D^2 h_2}{4} \rho g$$

$$\alpha = \frac{Dg}{4} \rho h_2 + \beta = \frac{Dg}{4} \rho h_1$$

$$\beta = \frac{Dg}{4} \rho (h_1 - h_2)$$

O también, llamando a $\frac{Dg}{4} = C$ la constante del tubo capilar, que se puede determinar de una vez para siempre, resulta la fórmula simplificada:

$$\beta = C \rho (g_1 - h_2) \text{ dinas/cm.} \quad (9)$$

La siguiente tabla contiene los valores de la "tensión superficial α " del "poder de extensión β " y del "ángulo de contacto θ ", obtenidos con el aparato del Dr. Richard von Dallwitz-Wegner, a la temperatura de unos 25° C., como valores medios de tres determinaciones en cada medida. Los bloques de metal fueron preparados en el laboratorio utilizando trozos de aleaciones antifricción para cojinetes, y los discos de succión fueron hechos con acero de eje. Los aceites lubricantes empleados son de tipo comercial, clasificados de acuerdo con los números de viscosidad S.A.E.

TABLA VIII

VALORES HALLADOS CON EL APARATO MEDIDOR DE LUBRICACION DEL DR. RICHARD VON DALLWITZ-WEGNER

SIGNIFICADOS

- α = tensión superficial (según este método)
- β = fuerza de adhesión o valor del engrase
- θ = ángulo de lubricación respecto del metal

ZAMAK 5

TIPO DE ACEITE	α dina/cm.	β dina/cm.	$\cos \theta$	θ
Aceite parafina	31,27	23,00	0,7355	42°40'
SAE 10	31,51	19,19	0,609	52°29'
SAE 20	31,63	23,27	0,7356	42°40'
SAE 30	32,08	22,41	0,6985	45°30'
SAE 40	31,79	22,47	0,7068	45°5'
SAE 50	33,49	26,53	0,7921	37°35'
SAE 60	32,61	25,17	0,7718	39°30'
SAE 70	33,37	25,08	0,7515	41°17'

ZAMAK 3

Aceite parafina	30,74	25,56	0,8314	33°45'
SAE 10	31,88	23,19	0,7274	43°20'
SAE 20	31,45	24,82	0,7891	37°55'
SAE 30	32,25	23,86	0,7398	42°20'
SAE 40	32,50	23,52	0,7236	43°40'
SAE 50	33,49	26,00	0,7763	39°5,
SAE 60	32,43	23,34	0,7197	44°0'
SAE 70	34,09	23,49	0,689	46°30'

ZAMAK 2

Aceite parafina	31,27	17,89	0,5721	55°5'
SAE 10	31,70	18,92	0,5968	53°25'
SAE 20	31,28	19,13	0,6115	52°20'
SAE 30	32,07	25,17	0,7848	38°20'
SAE 40	32,32	21,69	0,6711	47°50'
SAE 50	33,12	23,83	0,7195	44°20'
SAE 60	32,43	23,60	0,7277	43°20'
SAE 70	33,55	21,65	0,6453	49°50'

BRONCE

Aceite parafina	31,27	24,28	0,7764	39°5'
SAE 10	31,88	25,58	0,8023	36°40'
SAE 20	31,28	24,82	0,7934	37°30'
SAE 30	32,08	23,86	0,7437	42°0'
SAE 40	32,50	24,56	0,7556	40°55'
SAE 50	32,94	21,12	0,6411	50°5'
SAE 60	32,61	24,91	0,7638	40°15'
SAE 70	33,37	24,29	0,7278	43°20'

BRONCE FOSFOROSO

Aceite parafina	31,09	23,51	0,7561	40°50'
SAE 10	32,06	23,19	0,7233	43°40'
SAE 20	30,93	22,24	0,719	44°0'
SAE 30	32,25	22,81	0,7072	45°0'
SAE 40	32,50	24,30	0,7476	41°45'
SAE 50	33,12	23,83	0,7195	44°50'
SAE 60	32,61	26,75	0,8203	34°50'
SAE 70	33,37	23,76	0,712	44°35'

AUTO R

Aceite parafina	31,09	21,47	0,6905	43°40'
SAE 10	32,06	23,45	0,7314	43°0'
SAE 20	31,10	23,53	0,7565	40°50'
SAE 30	31,90	21,24	0,6658	48°15'
SAE 40	32,32	20,91	0,6469	49°45'
SAE 50	32,75	23,55	0,7191	44°0'
SAE 60	32,61	22,03	0,6755	47°30'
SAE 70	33,37	25,87	0,7752	39°10'

AUTO

Aceite parafina	31,27	22,49	0,7192	44°0'
SAE 10	31,88	22,65	0,7104	44°45'
SAE 20	31,28	25,60	0,8184	35°5'
SAE 30	31,90	25,17	0,7890	37°50'
SAE 40	32,32	23,52	0,7277	43°20'
SAE 50	33,12	20,04	0,6051	52°45'
SAE 60	32,43	22,55	0,6953	45°55'
SAE 70	33,55	26,13	0,7788	38°55'

TREFF

Aceite parafina	31,09	24,03	0,7729	39°25'
SAE 10	31,70	22,39	0,7063	45°5'
SAE 20	31,28	24,30	0,7768	39°5'
SAE 30	32,08	19,67	0,6131	52°10'
SAE 40	31,97	23,00	0,7194	44°0'
SAE 50	32,94	20,04	0,6083	52°30'
SAE 60	32,08	22,03	0,6867	46°40'
SAE 70	33,55	25,34	0,7552	40°55'

CORR

Aceite parafina	30,92	20,45	0,6613	48°35'
SAE 10	32,06	22,12	0,6899	46°20'
SAE 20	31,28	24,05	0,7688	39°45'
SAE 30	32,08	22,55	0,7029	45°20'
SAE 40	32,32	25,09	0,7762	39°5'
SAE 50	32,75	20,04	0,6119	52°18'
SAE 60	32,61	24,91	0,7638	40°15'
SAE 70	33,55	23,49	0,7001	45°30'

HIERRO

Aceite parafina	30,57	24,03	0,786	38°10'
SAE 10	31,69	22,65	0,7147	44°25'
SAE 20	31,10	24,30	0,7813	38°35'
SAE 30	31,90	21,24	0,6658	48°15'
SAE 40	32,32	24,83	0,7682	39°45'
SAE 50	32,75	22,20	0,6778	47°20'
SAE 60	32,43	24,12	0,7437	42°0'
SAE 70	33,19	24,29	0,7318	43°0'

AUTO AD

Aceite parafina	31,27	19,17	0,6130	52°10'
SAE 10	32,08	24,25	0,7563	40°50'
SAE 20	31,10	23,53	0,7565	40°50'
SAE 30	31,90	21,24	0,6658	48°15'
SAE 40	32,14	23,00	0,7156	44°20'
SAE 50	32,94	20,85	0,6329	50°45'
SAE 60	32,61	22,55	0,6915	46°15'
SAE 70	33,19	20,33	0,6125	52°15'

BABBITT

Aceite parafina	30,92	18,91	0,6115	52°18'
SAE 10	31,88	18,92	0,5934	53°35'
SAE 20	31,10	20,43	0,6569	49°0'
SAE 30	31,90	19,93	0,6247	51°20'
SAE 40	32,32	20,91	0,6469	49°45'
SAE 50	33,12	22,47	0,6784	47°15'
SAE 60	32,61	20,98	0,6433	49°55'
SAE 70	33,37	21,65	0,6487	49°35'

TENSIMETRO DE LECTURA DIRECTA DE LECOMTE DE NOÛY

El aparato diseñado por P. L. de Noüy (27) para la medida de la tensión superficial de los líquidos (Fig. 7), se compone

TENSIMETRO DE LECOMTE DE NOUY

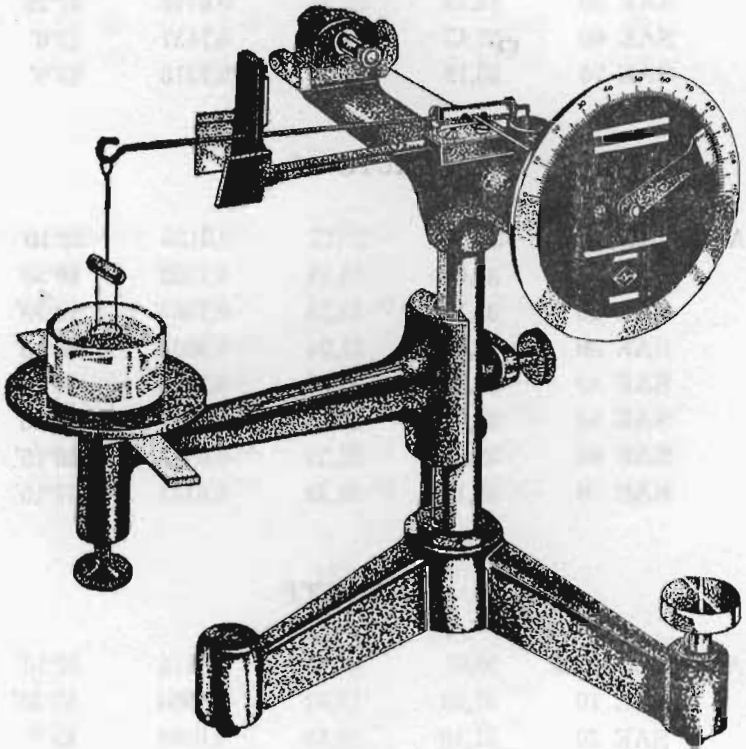


Fig. 7

esencialmente de un anillo de platino-iridio de 4 cm. de circunferencia, perfectamente calibrada por un procedimiento óptico, suspendido del extremo de un brazo de palanca muy ligero de aluminio, cuyo otro extremo está amordazado en el punto medio

del hilo de torsión. La adherencia obtenida cuando el anillo toca la superficie del líquido, se equilibra mediante la torsión del hilo de acero, hasta lograr que se desprenda el anillo, y en este instante, se mide la tensión superficial del líquido. La torsión del hilo queda indicada en el cuadrante de lecturas, mediante una alidada que lleva su nonius de décimas. Como es sabido, el ángulo de torsión será proporcional al momento señalado en el cuadrante, que está grabado directamente en dinas por centímetro.

El calibrado puede realizarse bien con un líquido de tensión superficial conocida, o colocando pesos arbitrarios sobre el anillo, de acuerdo con la fórmula:

$$\sigma = \frac{mg}{2L} \quad (10)$$

siendo m la masa agregada al anillo, g la intensidad de la gravedad y L la longitud del anillo. Por ejemplo, ajustando el brazo a cero, mediante torsión del anillo con el tornillo posterior, y colocando a continuación sobre el anillo una pesa de 0,5 gramos; para lograr nuevamente el equilibrio, habrá que girar la cabeza del hilo de acero hasta obtener en el cuadrante la lectura de 61,3 dinas por centímetro.

Este método del anillo es actualmente el más empleado para medir tensiones superficiales, debido principalmente a la rapidez en la medida y por ser ésta independiente del ángulo de contacto, alcanzándose una precisión de + 0,1%. Aunque la teoría del instrumento no tiene en cuenta el principio de similitud, sin embargo, la principal causa de error en las lecturas será por no mantener horizontalmente el plano del anillo, para lo cual habrá que desprenderlo del líquido elevando con mucha suavidad la palanca, a la vez que se baja lentamente el soporte del vaso que contiene el líquido, de modo que el índice del brazo se mantenga en el cero (28). Con un poco de habilidad, este aparato de la casa "Cambridge Instrument C. L.",

permite repetir las lecturas con una aproximación de 0,1 dinas por centímetro.

Para medir la tensión superficial del líquido a diferentes temperaturas, se dispuso un sistema de calefacción (Fig. 8),

DISPOSICION DE LA CALEFACCION EN EL TENSIMETRO

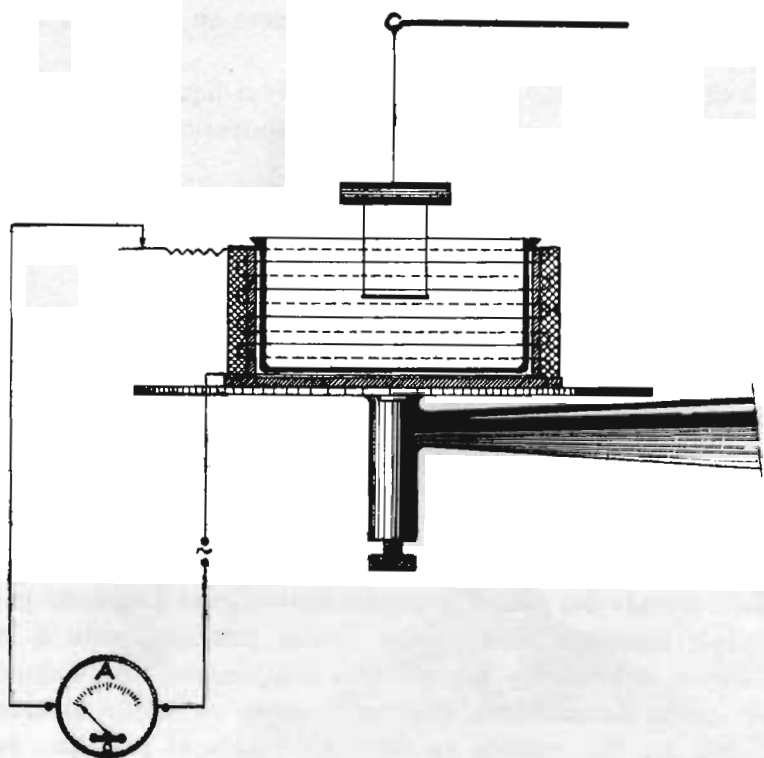


Fig. 8

consistente en una estufa eléctrica de forma cilíndrica, montada en serie con un reóstato y un amperímetro, con el fin de poder regular convenientemente la intensidad de la corriente eléctrica, y obtener así los estados térmicos estacionarios indispensables para realizar en ellos las medidas respectivas.

LA VARIACION TERMICA DE LA TENSION SUPERFICIAL, CALCULO DE LA TENSION SUPERFICIAL ACTIVA Y DE LOS DIAMETROS MOLECULARES DE LOS LIQUIDOS

Es conocida la doble significación de la tensión superficial σ ya como fuerza por unidad de longitud, ya como trabajo por unidad de superficie, pudiendo con este criterio evaluarse la energía puesta en juego en el proceso de la vaporización.

En efecto, el trabajo necesario para que un mol de una sustancia pase del estado líquido al estado de vapor, vendrá dado por $\sigma (s - s')$, siendo s y s' las superficies libres en ambas fases, y como la superficie libre s' de la fase líquida puede desprejarse frente a la s del vapor, el trabajo de vaporización de un mol de líquido quedará expresado por:

$$W = \sigma s$$

Una parte del calor latente de vaporización L del mol se necesitará para realizar la expansión $p(V - V')$, siendo V el volumen del vapor y V' el del líquido, donde también podemos desprejarse V' , y tratando el vapor como un gas ideal, tendremos $pV = RT$. La otra parte llamada calor latente interno L_i es la que se supone empleada para el aumento de la superficie libre de las moléculas al cambiar de fase:

$$L_i = \sigma s$$

$$L = RT + \sigma s$$

Esta hipótesis expuesta por S. Mokroushin (29) ha sido corregida por A. Espurz (30), quien mediante un tratamiento termodinámico, que resumimos a continuación, después de hallar el *calor latente de extensión molar* logró establecer el concepto de

tensión superficial activa σ_s , que debe de sustituir a la absoluta σ en la fórmula de Mokroushin:

$$L = RT + \sigma_s s$$

La teoría de A. Espurz queda comprobada cuando se calculan a diversas temperaturas los diámetros moleculares de un líquido; estando de acuerdo con la teoría cinética, pues los métodos cinéticos conducen a valores de los diámetros, dependientes de las velocidades de las moléculas que intervienen en el acto de la colisión, de suerte que los valores del diámetro resultan tanto menores cuando mayor es la violencia del choque, y, por consiguiente, la temperatura del líquido. Por el contrario, con la hipótesis de Mokroushin de la tensión superficial absoluta, se llega al absurdo de encontrar valores crecientes del diámetro con la temperatura.

Al expresar la energía interna de los líquidos, se puede desprestigiar la parte de la energía interna de volumen, quedando como únicas variables la superficie y la temperatura. Con esta simplificación, el primer principio de la termodinámica quedará expresado por:

$$\delta Q = dE - \sigma ds$$

o también

$$\delta Q = C_s dT + l_s ds \quad (11)$$

donde C_s es el calor específico a superficie constante y l_s el calor latente de la extensión. La energía interna vendrá dada por

$$dE = C_s dT + (l_s + \sigma) ds \quad (12)$$

y puesto que, el proceso es reversible, el segundo principio nos dará:

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{C_s}{T} dT + \frac{l_s}{T} ds \quad (13)$$

y como (12) y (13) son diferenciales exactas, se deduce inmediatamente el calor latente de extensión:

$$l_s = - T \frac{d\sigma}{dT} \quad (14)$$

y como en (12) $\left(\frac{\partial E}{\partial s}\right)_T = l_s + \sigma$ sustituyendo aquí el valor de l_s , se tiene:

$$\left(\frac{\partial E}{\partial s}\right)_T = \sigma - T \frac{d\sigma}{dT} \quad (15)$$

que representa la energía absorbida por el líquido cuando aumenta en una unidad su superficie a temperatura constante.

En 1886, enunció Eötvös (31) una ley, según la cual el *trabajo superficial molar* $\sigma_M = \sigma V^{2/3} = \sigma \left(\frac{M}{\rho}\right)^{2/3}$ igual al producto de la tensión superficial por la potencia 2/3 del volumen molar, es sólo función de la temperatura.

$$\sigma V^{2/3} = f(T)$$

Ramsay y Shields (32) propusieron para la fórmula de Eötvös la ecuación lineal siguiente:

$$\sigma_M = \sigma V^{2/3} = K (T'_c - T) \quad (16)$$

representando T'_c la temperatura crítica corregida, T la temperatura del experimento y K una constante.

Diferenciando la ecuación (16) se obtiene el valor $K = -\frac{d\sigma_M}{dT}$

que da la pendiente sobre el eje de temperaturas de la recta de Ramsay y Shields.

Multiplicando la ecuación (15) por $V^{2/3}$ se obtiene:

$$E_M = \left(\frac{\partial E}{\partial s} \right)_T V^{2/3} = \sigma_M - T \frac{d\sigma_M}{dT} = \sigma_M + KT = KT'_e \quad (17)$$

Como consecuencia de los trabajos de Madelung (33), Born y Courant (34), surgió la hipótesis de que en la tensión superficial deben de intervenir dos clases de energía, una de ellas estática σ_0 independiente de los movimientos moleculares, y la otra cinética σ_1 ligada a la temperatura, debiendo anularse en el cero absoluto.

Esta hipótesis se adapta al razonamiento seguido, pues si aplicamos la ecuación (16) al cero absoluto resulta:

$$(\sigma_M)_0 = \sigma_0 V_0^{2/3} = KT'_e \quad (18)$$

que es idéntica a la (17) confirmándose el carácter estático de la llamada *energía superficial molar*.

Por otra parte, la ecuación (16) puede tomar la forma:

$$\sigma_M = KT'_e - KT = E_M - L_s \quad (19)$$

donde L_s representa el calor latente de extensión molar, que de acuerdo con la (17) se identifica con el término KT , o sea, con la parte dependiente de la temperatura, y como ha de tener la misma forma que las otras energías, quedará expresado por:

$$L_s = \sigma_s V^{2/3} = KT \quad (20)$$

donde σ_s es llamado por A. Espurz *tensión superficial activa*, que tiene por expresión:

$$\sigma_s = \frac{E_M - \sigma_M}{V^{2/3}} = \sigma_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^{2/3} - \sigma$$

En los cuadros adjuntos aparecen los valores de tensión superficial molar $\sigma_M = \sigma \left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3}$ y de tensión superficial activa

$$\sigma_s = \frac{KT}{\left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3}} \text{ en unidades C.G.S.}$$

El cálculo de la constante k , se hizo gráficamente, midiendo las pendientes de las rectas σ_M frente a las temperaturas. En relación con éste, hay que hacer constar, que el empleo de σ_s representa la ventaja de ser independiente de los errores experimentales en la medida de la tensión superficial absoluta, siempre que el cálculo de k corresponda con un promedio correcto.

Finalmente, se ponen los valores medios de los diámetros moleculares, aplicando la fórmula de A. Espurz:

$$d = 4,41 \times 10^{-9} \sqrt{\frac{L - RT}{\sigma_s}} \quad (21)$$

que como tales diámetros de la esfera de acción de las moléculas, disminuyen al crecer la temperatura, como tiene previsto la teoría cinética.

METODO DEL TRANSPORTE PARA MEDIR LA PRESION DE VAPOR DE LOS LIQUIDOS

Este método se aplica especialmente para la medida de pequeñas presiones de vapor. Consiste en hacer pasar a través del líquido cuya presión de vapor se pretende medir, un volumen conocido de un gas inerte para el vapor, que queda saturado de éste a una temperatura fija. La cantidad de vapor del líquido arrastrado por el gas inerte, se determina por la pérdida de peso que experimenta el líquido durante la prueba.

Este método fue empleado, por vez primera, por Regnault, para líquidos puros (35); luego por Tamman, para soluciones acuosas (36) y por Pfaunder, para el mercurio (37).

Aunque la teoría es muy sencilla, sin embargo, es necesario tomar grandes precauciones experimentales, para lograr resultados exactos. Si el gas inerte G se satura con el vapor del líquido A, la presión total de la mezcla (sea 1 atm.) será igual a la suma de la presión parcial X del vapor de A (que puede tomarse como a presión de vapor del líquido a la temperatura considerada) y de la presión parcial del gas inerte (1—X). De acuerdo con la ley de las presiones parciales de Dalton, X y (1—X) estarán en la misma relación que el número de moles n_a del vapor el líquido A que ha sido arrastrado, y del número de moles n_g del gas inerte, ambos presentes en la mezcla:

$$\frac{X}{1 - X} = \frac{n_a}{n_g} \quad (22)$$

El valor de $n_a = \frac{m_a}{M_a}$ se obtiene a partir de la masa m_a del vapor del líquido A que ha sido transportada y del peso molecular M_a del líquido A en forma de vapor. Para calcular el valor de n_g aplicaremos la ecuación de los gases perfectos:

$$n_g = \frac{PV}{RT}$$

puesto que la presión X es muy pequeña frente a (1—X), podremos tomar el valor de p como presión de la mezcla; que en el caso de trabajar a la presión atmosférica será $p = 1$ atm. El volumen V del gas inerte, que se hace pasar para formar la mezcla de transporte con el vapor del líquido, será fácil de medir con un contador de gases. La temperatura T será la que señale el termómetro del termostato.

Para 1 atm., el valor de n_g será $\frac{V}{RT}$ que sustituido en (22) dará:

$$\frac{X}{1-X} = \frac{m_a RT}{M_a V} \quad (23)$$

Por ser la presión X muy pequeña frente a 1 atm., esta ecuación se reducirá a:

$$X = \frac{m_a RT}{V M_a} \quad (24)$$

El valor $\frac{m_a}{V}$ representará la densidad del vapor en la mezcla, que se podrá hallar extrapolando gráficamente para un tiempo infinito de paso del volumen V , tomando la inversa del tiempo en abscisas, y la relación $\frac{m_a}{V}$ en ordenadas.

ARTIFICIO EXPERIMENTAL PARA LA MEDIDA DE LAS PRESIONES DE VAPOR DE LOS ACEITES LUBRICANTES

El aparato utilizado para medir las presiones de vapor de los diferentes aceites lubricantes que figuran en este trabajo, es el representado esquemáticamente en la figura 9. El gas empleado en estos experimentos fue aire seco, al que se hizo burbujear a través del aceite contenido en un frasco especial de vidrio, diseñado por nosotros, manteniéndose la corriente de aire seco con una bomba neumática colocada al final del sistema.

El aire atmosférico penetra a través de un filtro de algodón A en la batería de las cuatro torres desecadoras; la 1 que contiene gel de sílice, la 2 cloruro cálcico, la 3 pentóxido de fósforo y la 4 gel de sílice con indicador de sal de cobalto. Después de

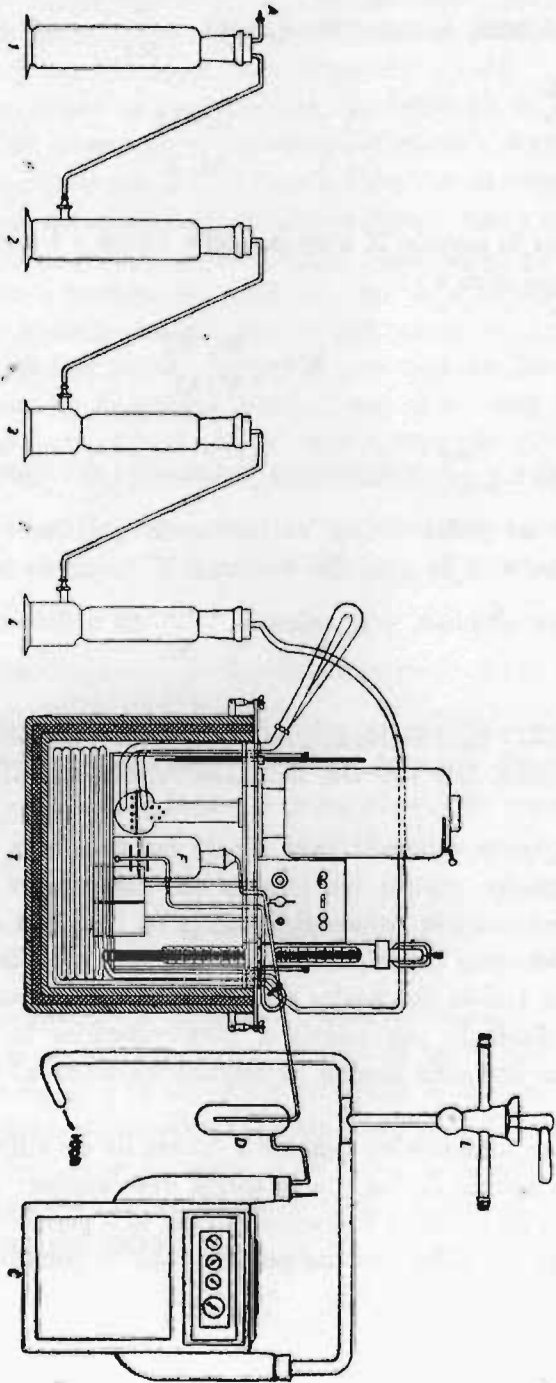


Fig. 9

realizar varios ensayos, se adoptó esta disposición para la batería, por resultar la más satisfactoria para la desecación del aire.

El aire completamente seco que sale de esta batería, es calentado a continuación en el serpentín del "ultratermostato Bühler" T, adquiriendo la misma temperatura del aceite contenido en el frasco F, donde burbujea el aire seco a través del aceite, verificándose así la vaporización por transporte de una masa de aceite proporcional a su tensión de vapor. Pesando el frasco con el aceite, antes y después de la prueba, la diferencia de pesadas dará la masa de aceite vaporizada y que ha sido transportada.

La mezcla de aire seco y vapor de aceite se la hace pasar ahora a través del depósito regulador D, que a la vez sirve de "trap", siendo medido el volumen del flujo uniforme de la mezcla gaseosa que ha pasado en un tiempo determinado, con el contador de gases C. Al final, se encuentra el sistema de succión, formado por la bomba rotatoria de vacío V y llave de regulación L del flujo gaseoso, la cual permite variar la velocidad de la corriente de aire seco que ha de vaporizar aceite en el frasco.

CALCULO DEL CALOR LATENTE DE VAPORIZACION DE LOS ACEITES LUBRICANTES Y SU VARIACION CON LA TEMPERATURA

Después que han sido determinadas experimentalmente las presiones de vapor del aceite a dos temperaturas conocidas, se emplea la ecuación de Clausius-Clapeyron en la forma:

$$L = 4,576 \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \log. \frac{P_2}{P_1} \text{ cal/mol.} \quad (25)$$

que da el valor medio del calor latente de vaporización L del líquido para el intervalo térmico $T_2 - T_1$. Esta ecuación resul-

ta satisfactoria cuando las presiones de vapor son bajas para el intervalo térmico.

Como de acuerdo con la teoría, para calcular los diámetros moleculares de los aceites, necesitamos conocer el valor del calor latente de vaporización de los mismos a diferentes temperaturas. Siendo bien sabido, que el calor de vaporización disminuye cuando crece la temperatura, anulándose en el "punto crítico". Entre las numerosas fórmulas empíricas propuestas que dan la variación del calor de vaporización con la temperatura, hemos elegido por considerarla de fácil manejo y de buenos resultados comprobados, la de W. J. Jones y S. T. Bowden (38) que relaciona el calor de vaporización L de un líquido con las densidades ortobáricas del líquido ρ y del vapor ρ_v respectivamente a la temperatura considerada:

$$L = a (\rho - \rho_v)^{1/3} \quad (26)$$

Al aplicarla en nuestras experiencias, habrá que tener en cuenta, que ρ_v es prácticamente despreciable frente a ρ para aquéllas temperaturas que están por debajo del punto de ebullición del aceite, quedando reducida la ecuación a:

$$L = a \rho^{1/3} \quad (27)$$

La constante a quedará determinada una vez que se conozcan experimentalmente los valores de L y de ρ a una misma temperatura.

ACEITE DE PARAFINA

PESO MOLECULAR MEDIO 362

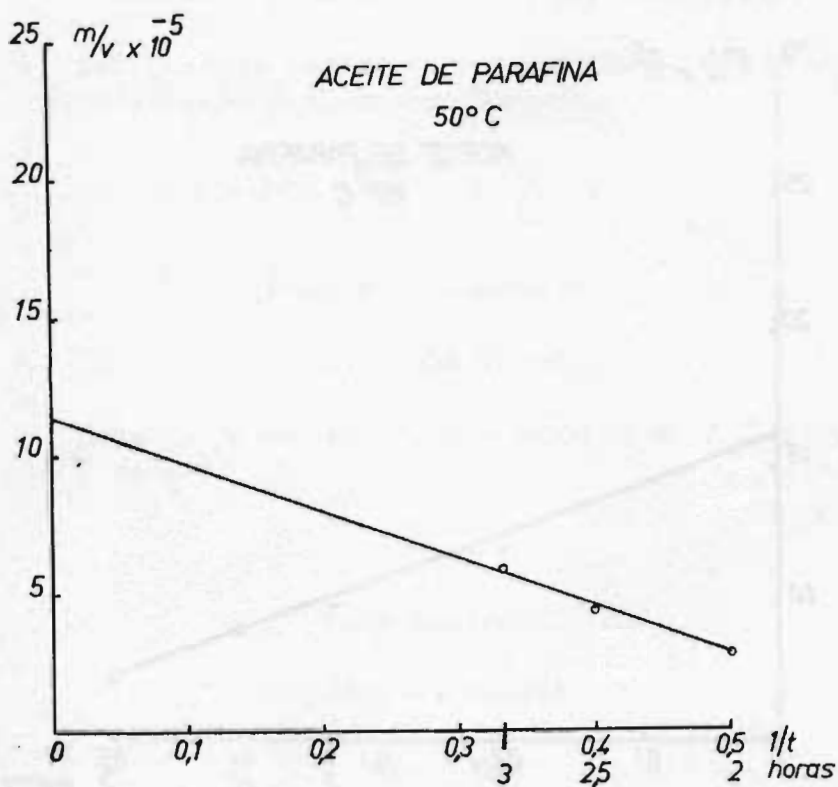
Valores medios de la pérdida de masa del aceite, obtenidos a partir de tres determinaciones por el método del transporte.

Temperatura 50° C.

Tiempo empleado	Volumen de gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	594 litros	0,0344 g	0,000057 g/l
2,5 "	622 "	0,0272 "	0,000044 "
2 "	606 "	0,0179 "	0,000029 "

Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica)

$$m/v = 0,000115 \text{ g/l.}$$

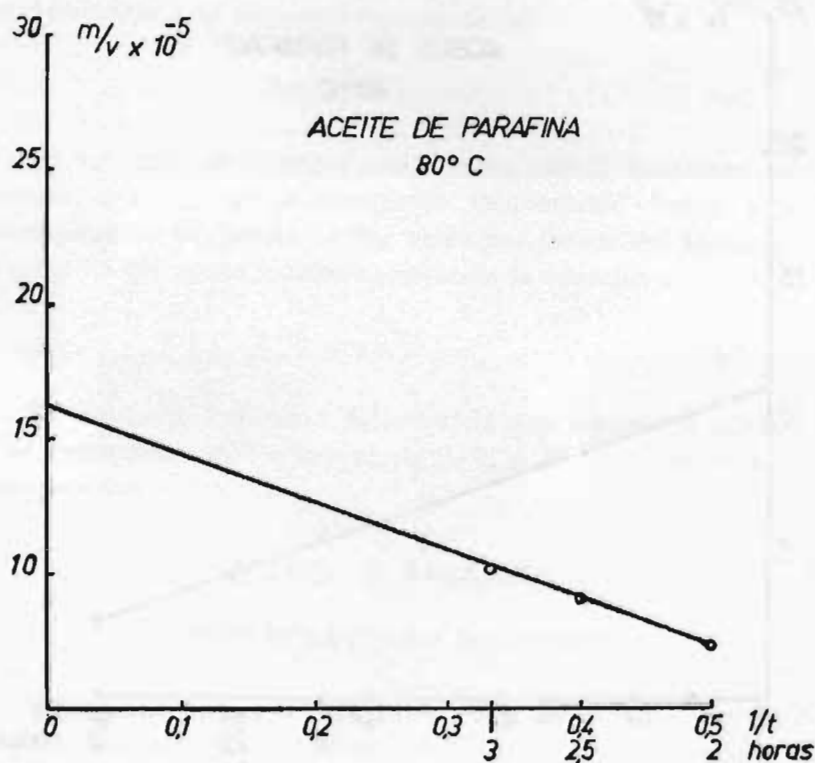


Temperatura 80° C.

Tiempo empleado	Volumen de gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	598 litros	0,0605 g	0,000101 g/l
2,5 "	595 "	0,0535 "	0,000090 "
2 "	596 "	0,0432 "	0,000072 "

Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica)

$$m/v = 0,000162 \text{ g/l.}$$



ACEITE DE PARAFINA

PESO MOLECULAR MEDIO 362

Cálculo de las presiones de vapor de acuerdo con la fórmula del transporte:

$$p = \frac{m}{V} \frac{RT}{M}$$

Presión de vapor del aceite a 50° C: $P_{50} = 0,000008$ atm.

Presión de vapor del aceite a 80° C: $P_{80} = 0,000013$ atm.

Calor medio de vaporización de aceite entre 50° C. y 80° C., según la ecuación de Clausius — Clapeyron:

$$L = 4,576 \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \log \frac{P_2}{P_1} \text{ cal/mol}$$

(Temperatura promedia 65° C)

$$L = 5.840,5 \text{ cal/mol}$$

Cálculo a la constante de la ecuación de W. J. Jones y S. T. Bowden.

$$L = a \rho^{1/3}$$

Temperatura 65° C.

$$5.840,5 = a \cdot 0,8435^{1/3}$$

$$a = 7.328$$

TABLA IX
ACEITE DE PARAFINA

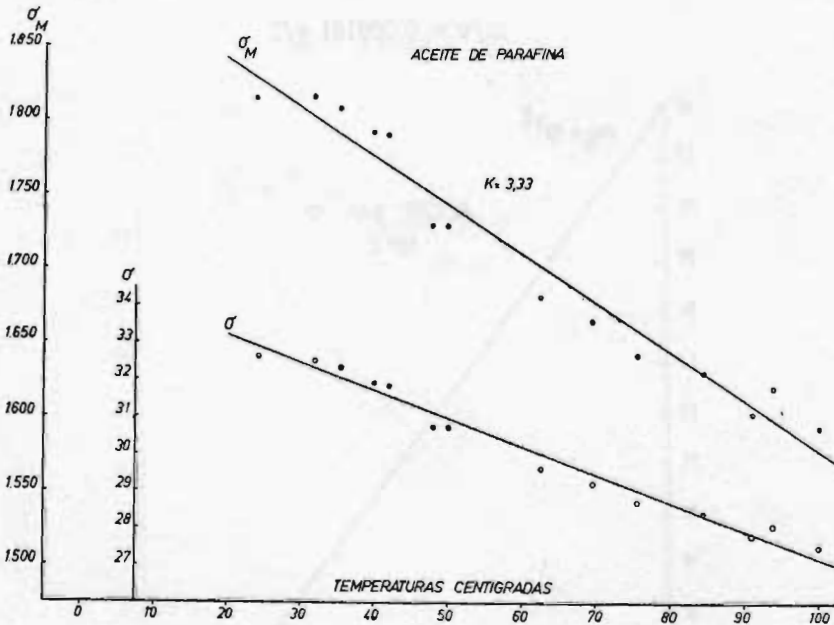
Tensión superficial		Densidad ortobárica	Tensión superficial molar
t° C	σ	ρ	$\sigma \left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3}$
24,2	32,6	0,8690	1.818,3
32,2	32,5	0,8640	1.819,8
35,6	32,3	0,8619	1.811,5
40,0	31,9	0,8591	1.792,9
42,1	31,8	0,8578	1.789,1
47,8	30,7	0,8542	1.732,0
50,0	30,7	0,8529	1.733,9
62,4	29,6	0,8451	1.681,9
69,8	29,2	0,8405	1.665,3
75,6	28,7	0,8369	1.641,5
84,6	28,4	0,8312	1.631,7
91,1	27,8	0,8272	1.602,4
94,2	28,1	0,8252	1.622,3
100,0	27,5	0,8216	1.592,3

K=3,33 Constante de Eötvös

TABLA X
ACEITE DE PARAFINA

Tensión superficial activa	Calor molar de vaporización		Diámetro molecular
t° C	σ_s	L	$d \times 10^8$ cm
24,2	17,7	6,076,4	7,8
32,2	18,1	6.029,5	7,6
35,6	18,3	6.011,9	7,5
40,0	18,5	5.985,5	7,5
42,1	18,7	5.973,1	7,5

47,8	18,9	5.940,1	7,4
50,0	19,0	5.927,6	7,4
62,4	19,6	5.857,3	7,2
69,8	20,0	5.812,6	7,1
75,6	20,3	5.781,1	7,0
84,6	20,7	5.726,1	6,9
91,1	21,0	5.689,5	6,7
94,2	21,2	5.672,6	6,7
100,0	21,4	5.637,4	6,7



ACEITE LUBRICANTE S. A. E. 10

PESO MOLECULAR MEDIO 310

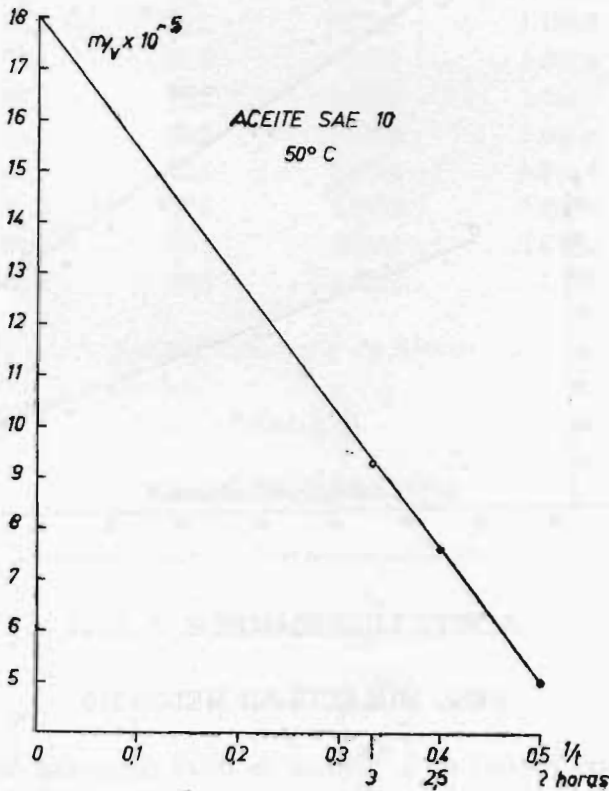
Valores medios de la pérdida de masa del aceite obtenido a partir de tres determinaciones por el método del transporte.

Temperatura 50° C

Tiempo empléado	Volumen de gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	599 litros	0,0560 g	0,000093 g/l
2,5 "	601 "	0,0457 "	0,000076 "
2 "	596 "	0,0344 "	0,000050 "

Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica).

$$m/v = 0,000181 \text{ g/l}$$

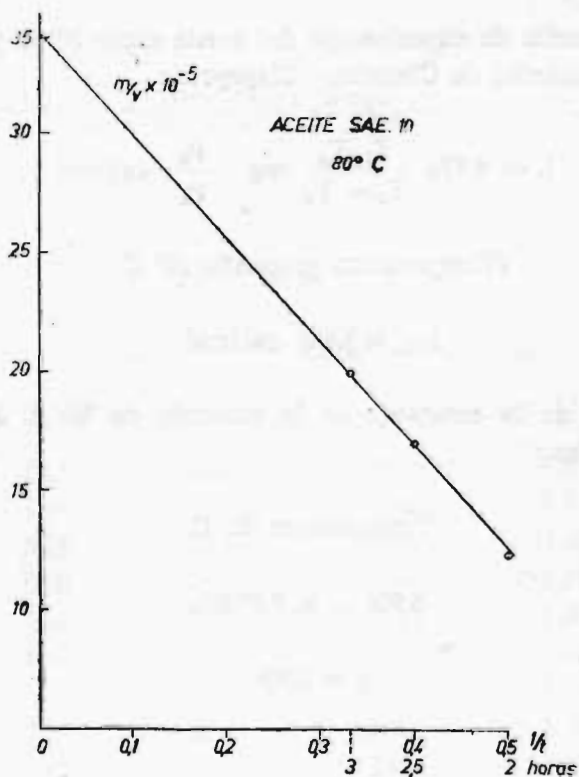


Temperatura 80° C

Tiempo empleado	Volumen de gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	600 litros	0,1203 g	0,000201 g/l
2,5 "	602 "	0,1032 "	0,000171 "
2 "	600 "	0,0743 "	0,000123 "

Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica).

$$m/v = 0,00035 \text{ g/l}$$



ACEITE LUBRICANTE S. A. E. 10

PESO MOLECULAR MEDIO 310

Cálculo de las presiones de vapor de acuerdo con la fórmula del transporte:

$$p = \frac{m}{v} \frac{RT}{M}$$

Presión de vapor del aceite a 50° C: $P_{50} = 0,000015$ atm.

Presión de vapor del aceite a 80° C: $P_{80} = 0,000033$ atm.

Calor medio de vaporización del aceite entre 50° C y 80° C, según la ecuación de Clausius - Clapeyron:

$$L = 4,576 \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \log \frac{P_2}{P_1} \text{ cal/mol}$$

(Temperatura promedia 65° C)

$$L_{65} = 5.956 \text{ cal/mol}$$

Cálculo de la constante de la ecuación de W. J. Jones y S. T. Bowden:

Temperatura 65° C

$$5.956 = a \cdot 0,8799^a$$

$$a = 7.065$$

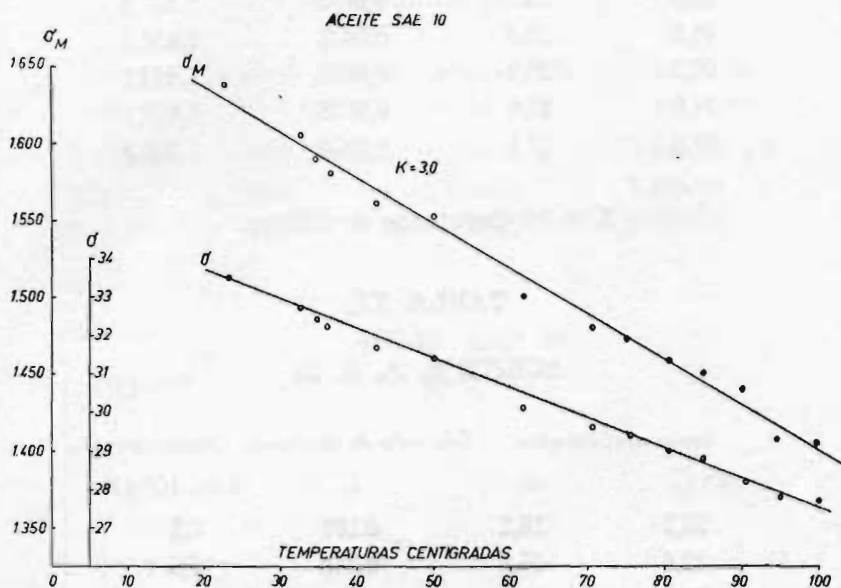


TABLA XI

ACEITE S. A. E. 10

$t^{\circ} C$	Tensión superficial		Densidad ortobarica		Tensión superficial molar	
	σ	ρ	$\sigma \left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3}$			
23,7	33,5	0,9063	1.638,4			
32,4	32,7	0,9008	1.605,8			
34,8	32,4	0,8992	1.592,9			
36,0	32,1	0,8985	1.579,1			
42,6	31,6	0,8942	1.559,4			
50,0	31,4	0,8895	1.555,0			
61,8	30,1	0,8819	1.499,1			
70,5	29,6	0,8764	1.480,4			
75,2	29,4	0,8734	1.473,8			

80,6	29,0	0,8699	1.457,6
84,8	28,8	0,8672	1.450,5
90,2	28,2	0,8638	1.442,1
94,8	27,8	0,8608	1.407,1
99,8	27,7	0,8576	1.405,5

$K = 3,0$ Constante de Eötvös.

TABLA XII

ACEITE S. A. E. 10

Tensión superficial activa	Calor molar de vaporización	Diámetro molecular	
$t^{\circ} C$	σ_s	L	$d \times 10^8$ cm
23,7	18,2	6.196	7,7
32,4	18,6	6.146	7,6
34,8	18,8	6.131	7,6
36,0	18,8	6.125	7,5
42,6	19,2	6.086	7,4
50,0	19,6	6.043	7,3
61,8	20,2	5.975	7,1
70,5	20,6	5.925	7,0
75,2	20,8	5.898	7,0
80,6	21,1	5.866	6,9
84,8	21,3	5.842	6,8
90,2	21,3	5.812	6,8
94,8	21,8	5.785	6,7
99,8	22,0	5.756	6,7

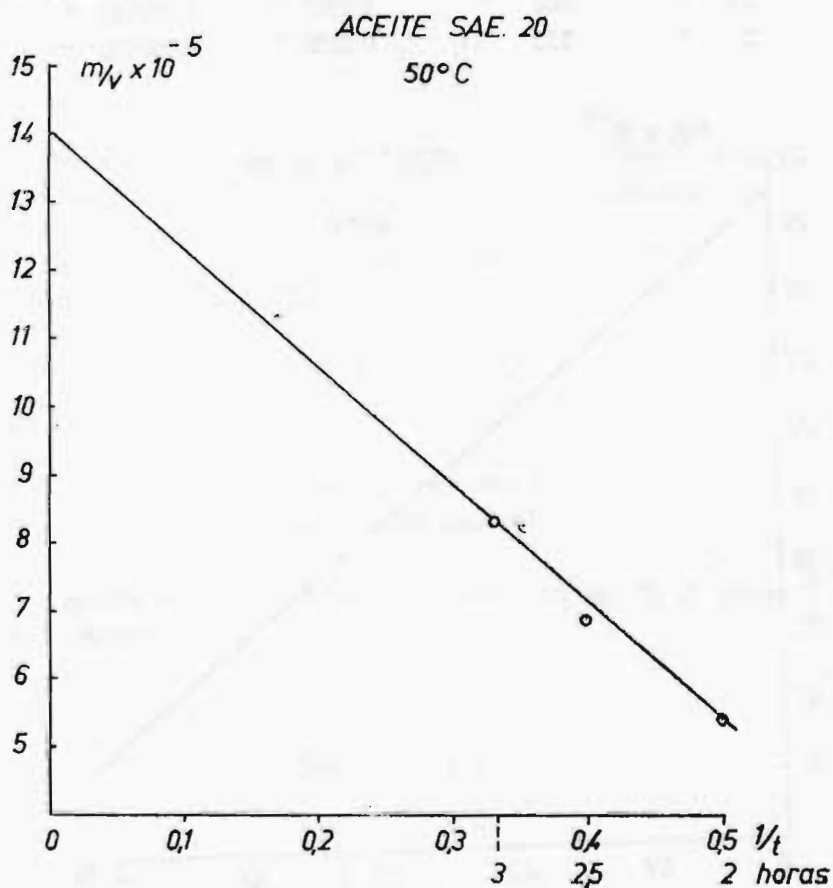
ACEITE LUBRIFICANTE S. A. E. 20

PESO MOLECULAR MEDIO 375

Valores medios de la pérdida de masa del aceite obtenido a partir de tres determinaciones por el método del transporte.

Temperatura 50° C

Tiempo empleado	Volumen de gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	600 litros	0,0482 g	0,000083 g/l
2,5 "	600 "	0,0413 "	0,000069 "
2 "	598 "	0,0325 "	0,000054 "

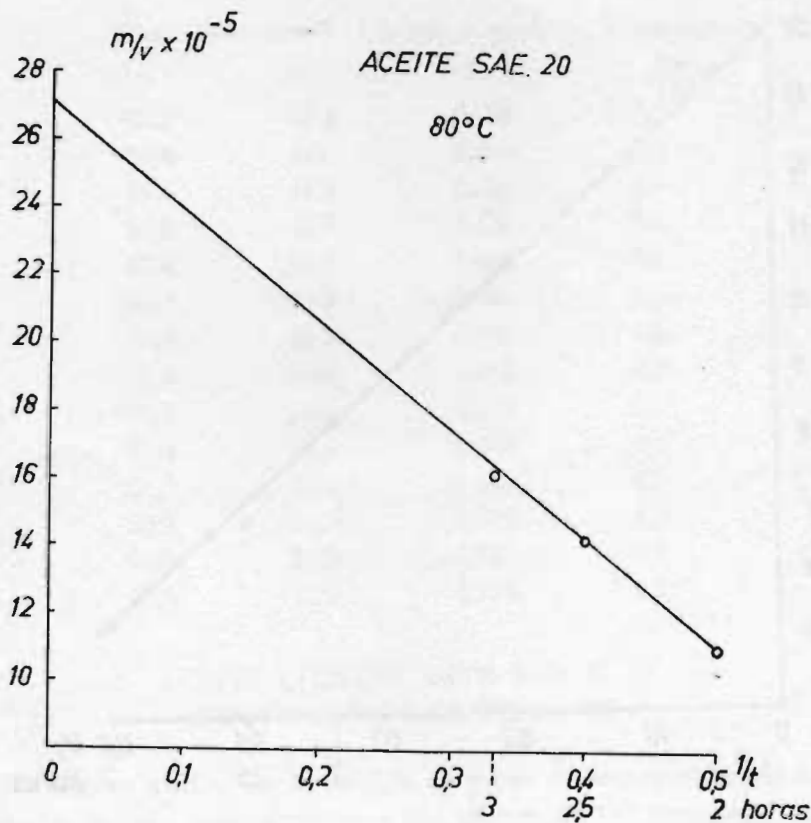


Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica):

$$m/v = 0,00014 \text{ g/l}$$

Temperatura 80° C.

Tiempo empleado	Volumen de gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	598 litros	0,0968 g	0,000161 g/l
2,5 "	600 "	0,0853 "	0,000142 "
2 "	598 "	0,0659 "	0,000110 "



Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica):

$$m/v = 0,00027 \text{ g/l}$$

ACEITE LUBRICANTE S. A. E. 20
PESO MOLECULAR MEDIO 375

Cálculo de las presiones de vapor de acuerdo con la fórmula del transporte:

$$p = \frac{m}{v} \frac{RT}{M}$$

Presión de vapor del aceite a 50° C.: $P_{50} = 0,0000099 \text{ atm.}$

Presión de vapor del aceite a 80° C.: $P_{80} = 0,0000208 \text{ atm.}$

Calor medio de vaporización del aceite entre 50° C. y 80° C. según la ecuación de Clausius - Clapeyron:

$$L = 4,576 \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \log \frac{P_2}{P_1} \text{ cal/mol}$$

(Temperatura promedia 65° C)

$$L_{65} = 5.566 \text{ cal/mol}$$

Cálculo de la constante de la ecuación de W. J. Jones y S. T. Bowden:

$$L = a\rho^{4/3}$$

(Temperatura 65° C)

$$5.566 = a \cdot 0,8535^{4/3}$$

$$a = 6.860$$

TABLA XIII

ACEITE S. A. E. 20

t° C	Tensión superficial	Densidad ortobárica	Tensión superficial molar
	σ	ρ	$\sigma \left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3}$
24,6	32,7	0,8789	1.853,2
30,4	31,9	0,8725	1.812,9
39,8	30,9	0,8693	1.764,1
51,8	30,6	0,8618	1.757,1
58,7	29,7	0,8574	1.711,2
68,4	29,0	0,8513	1.678,9
69,9	28,8	0,8504	1.668,5
77,8	28,3	0,8454	1.646,0
80,0	28,1	0,8440	1.636,1
85,1	27,8	0,8408	1.622,8
87,0	27,7	0,8396	1.618,5
88,6	27,4	0,8386	1.602,2
90,2	27,2	0,8376	1.591,8
93,5	27,0	0,8355	1.582,7
95,8	26,8	0,8340	1.572,8
100,0	26,5	0,8314	1.558,5

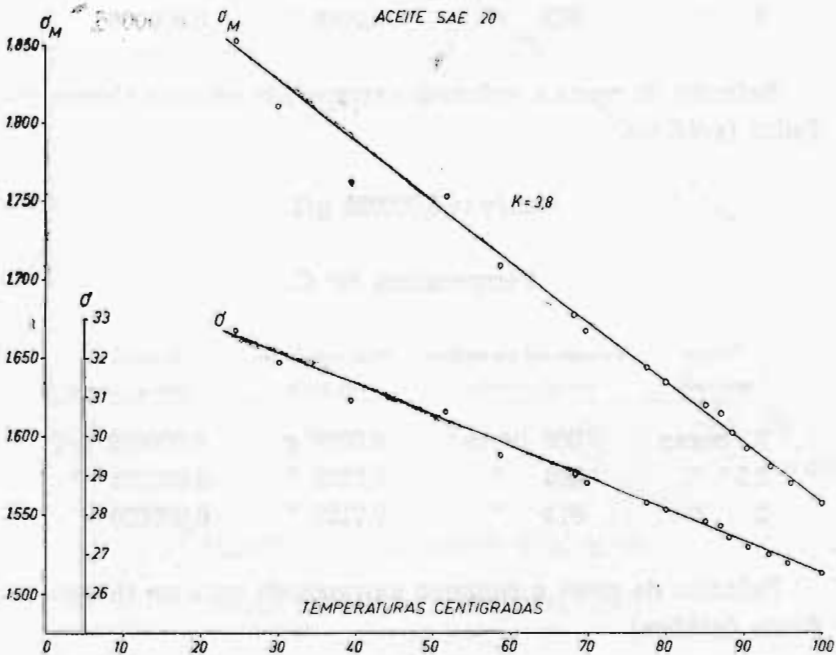
K = 3,8 Constante de Eötvös.

TABLA XIV

ACEITE S. A. E. 20

t° C	Tensión superficial activa	Calor molar de vaporización	Diámetro molecular
	σ_s	L	$d \times 10^8$ cm
24,6	20,0	5.775	7,1
30,4	20,3	5.719	7,0
39,8	20,8	5.691	6,9
51,8	21,5	5.626	6,7

58,7	21,9	5.587	6,6
68,4	22,4	5.534	6,5
69,9	22,5	5.527	6,5
77,8	22,9	5.483	6,4
80,0	23,0	5.471	6,3
85,1	23,3	5.444	6,3
87,0	23,4	5.433	6,3
88,6	23,5	5.425	6,2
90,2	23,6	5.416	6,2
93,5	23,7	5.398	6,2
95,8	23,9	5.385	6,1
100,0	24,1	5.363	6,1



ACEITE LUBRICANTE S. A. E. 30

PESO MOLECULAR MEDIO 422

Valores de la pérdida de masa del aceite obtenidos a partir de tres determinaciones por el método del transporte.

Temperatura 50° C.

Tiempo empleado	Volumen de gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	603 litros	0,0083 g	0,000014 g/l
2,5 "	602 "	0,0071 "	0,000011 "
2 "	603 "	0,0040 "	0,0000066 "

Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica).

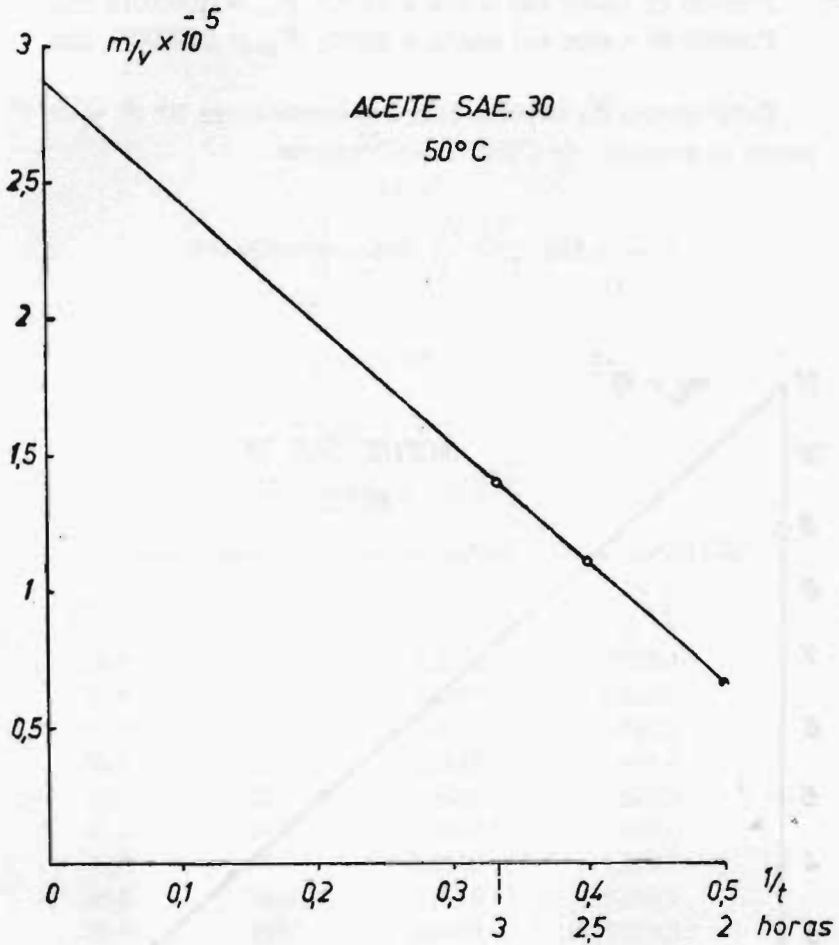
$$m/v = 0,000028 \text{ g/l}$$

Temperatura 80° C.

Tiempo empleado	Volumen del gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	600 litros	0,0301 g	0,000050 g/l
2,5 "	600 "	0,0229 "	0,000038 "
2 "	613 "	0,0120 "	0,000020 "

Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica).

$$m/v = 0,00011 \text{ g/l}$$



ACEITE LUBRICANTE S. A. E. 30

PESO MOLECULAR MEDIO 422

Cálculo de las presiones de vapor de acuerdo con la fórmula del transporte:

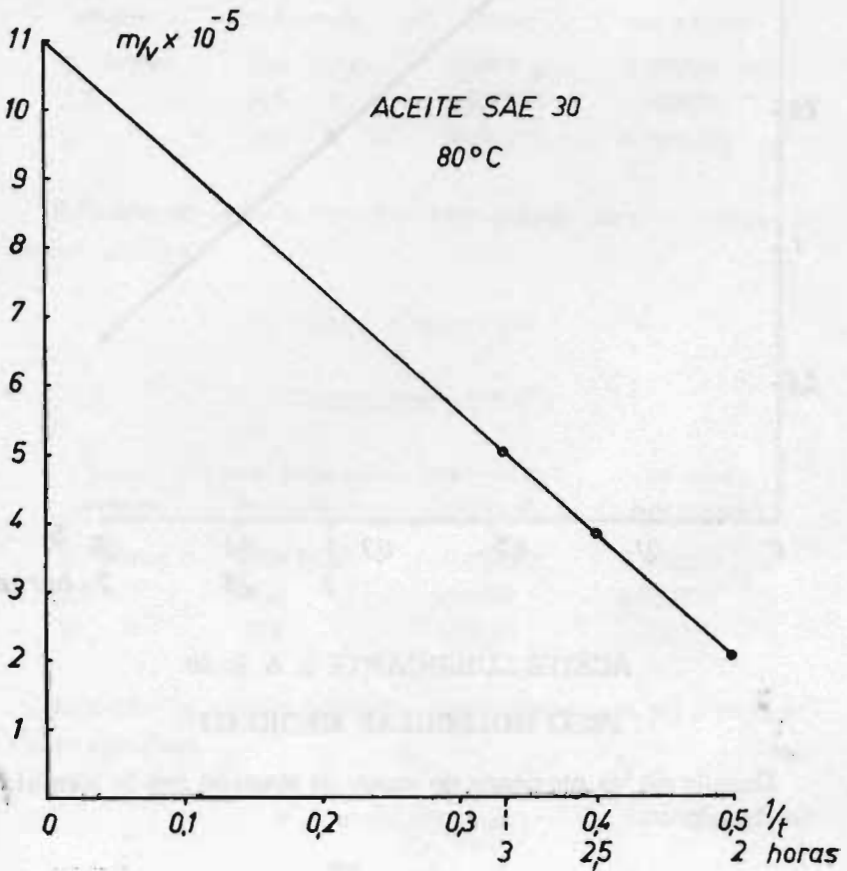
$$p = \frac{m}{v} \frac{RT}{M}$$

Presión de vapor del aceite a 50° C: $P_{50} = 0,0000018$ atm.

Presión de vapor del aceite a 80° C: $P_{80} = 0,0000075$ atm.

Calor medio de vaporización del aceite entre 50° C. y 80° C. según la ecuación de Clausius - Clepeyron:

$$L = 4,576 \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \log \frac{P_2}{P_1} \text{ cal/mol}$$



(Temperatura promedia 65° C)

$$L_{65} = 10.784 \text{ cal/mol}$$

Cálculo de la constante de la ecuación de W. J. Jones y S. T. Bowden:

$$L = a \rho^{4/3}$$

Temperatura 65° C.

$$10.784 = a \cdot 0,8661^{4/3}$$

$$a = 13.062$$

TABLA XV

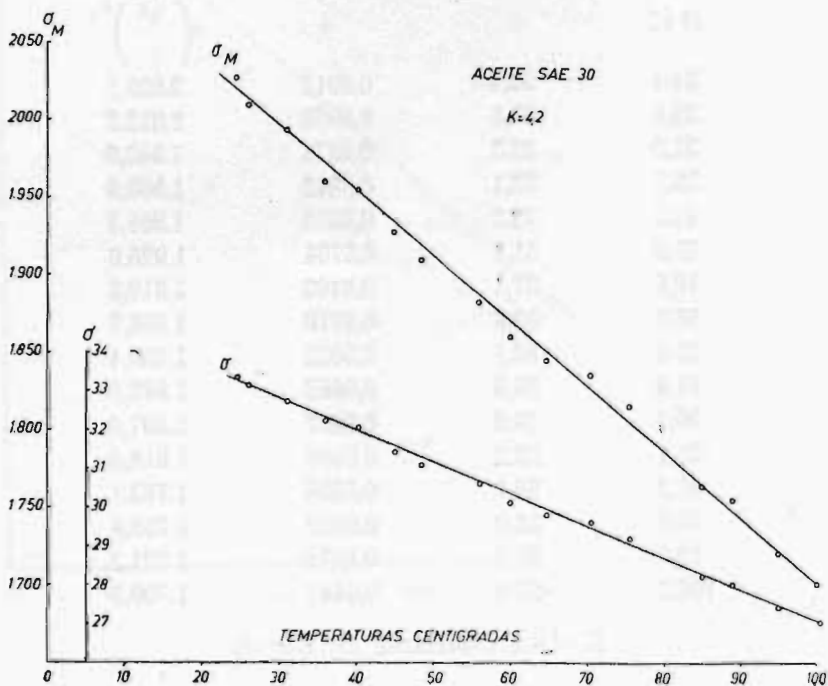
ACEITE S. A. E. 30

t° C	Tensión superficial	Densidad ortobárica	Tensión superficial molar
	σ	ρ	$\sigma \left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3}$
24,4	33,4	0,8912	2.029,1
25,8	33,1	0,8903	2.012,2
31,0	32,7	0,8871	1.992,6
35,7	32,1	0,8842	1.960,4
40,1	32,0	0,8815	1.958,3
45,0	31,4	0,8784	1.926,0
48,6	31,1	0,8762	1.910,8
56,0	30,6	0,8716	1.886,7
60,0	30,1	0,8692	1.859,4
64,8	29,8	0,8662	1.845,1
70,4	29,6	0,8627	1.837,6
75,1	29,2	0,8598	1.816,8
85,2	28,2	0,8536	1.763,1
89,0	28,0	0,8512	1.753,9
95,0	27,4	0,8475	1.721,3
100,2	27,0	0,8443	1.700,5

K = 4,2 Constante de Eötvös.

TABLA XVI
ACEITE S. A. E. 30.

Tensión superficial activa $t^{\circ} \text{C}$	σ_s	Calor molar da vaporización L	Diámetro molecular $d \times 10^8 \text{ cm}$
24,4	20,5	11.176	10,0
25,8	20,6	11.153	10,0
31,0	20,9	11.108	9,9
35,7	21,2	11.060	9,8
40,1	21,5	11.015	9,7
45,0	21,8	10.963	9,6
48,6	22,0	10.926	9,5
56,0	22,4	10.850	9,4
60,0	22,6	10.810	9,3
64,8	22,9	10.760	9,2
70,4	23,2	10.703	9,2
75,1	23,5	10.654	9,1
85,2	24,0	10.552	9,0
89,0	24,3	10.513	8,9
95,0	24,6	10.452	8,8
100,2	24,9	10.400	8,7



ACEITES LUBRICANTES S. A. E. 40

PESO MOLECULAR MEDIO 463

Valores medios de la pérdida de masa del aceite obtenido a partir de tres determinaciones por el método del transporte.

Temperatura 50° C

Tiempo empleado	Volumen del gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	606 litros	0,0062 g	0,000010 g/l
2,5 "	603 "	0,0045 "	0,000007 "
2 "	599 "	0,0024 "	0,000004 "

Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica).

$$m/v = 0,000022 \text{ g/l}$$

Temperatura 80° C.

Tiempo empleado	Volumen del gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen:
3 horas	600 litros	0,0275 g	0,000046 g/l
2,5 "	602 "	0,0211 "	0,000035 "
2 "	598 "	0,0160 "	0,000026 "

Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica).

$$m/v = 0,000088 \text{ g/l}$$

ACEITE LUBRICANTE S. A. E. 40

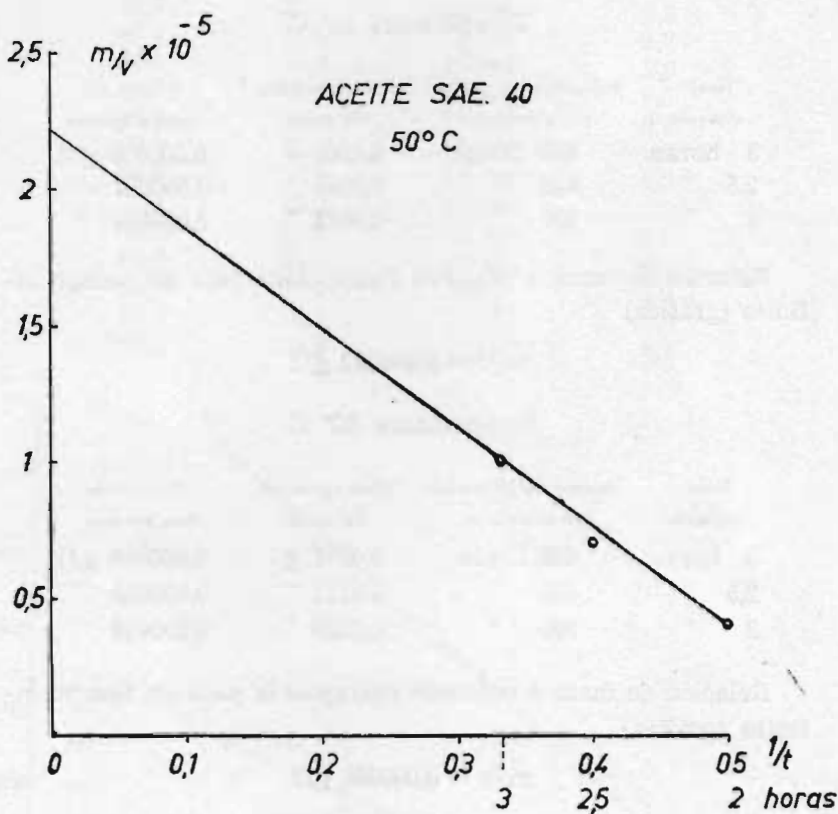
PESO MOLECULAR MEDIA 463

Cálculo de las presiones de vapor de acuerdo con la fórmula del transporte:

$$p = \frac{m}{v} \frac{RT}{M}$$

Presión de vapor del aceite a 50° C.: $P_{50} = 0,0000013$ atm.

Presión de vapor del aceite a 80° C.: $P_{80} = 0,0000055$ atm.

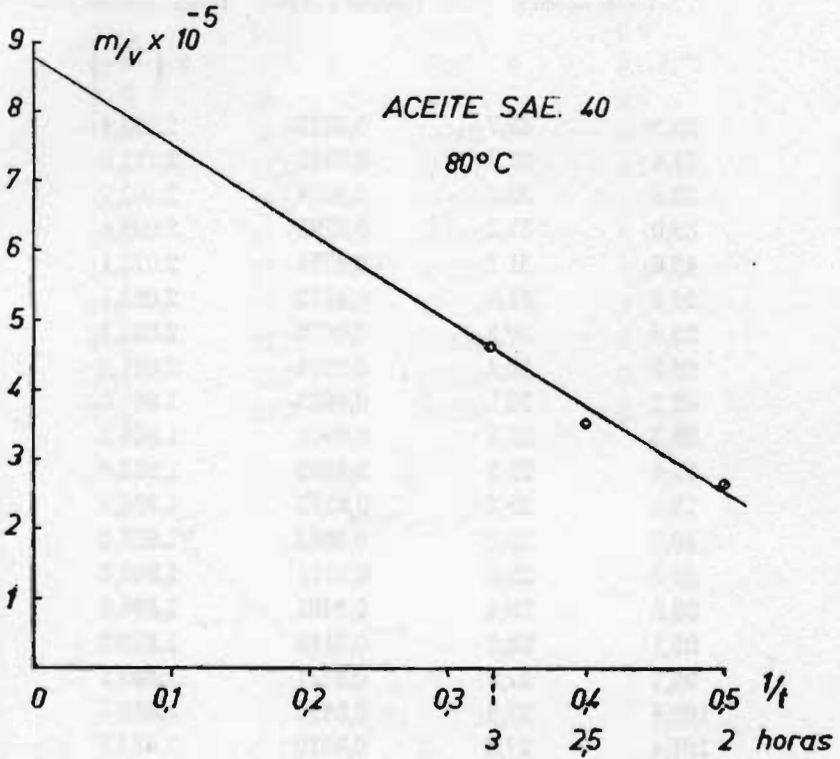


Calor medio de vaporización del aceite entre 50° C. y 80° C. según la ecuación de Clausius - Clapeyron:

$$L = 4,576 \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \log \frac{P_2}{P_1} \text{ cal/mol}$$

(Temperatura promedia 65° C.)

$$L_{65} = 10.877 \text{ cal/mol}$$



Cálculo de la constante de la ecuación de W. J. Jones y S. T. Bowden:

$$L = a \rho^{1/2}$$

(Temperatura 65° C.)

$$10.877 = a \cdot 0,8635^{1/2}$$

$$a = 13.227$$

TABLA XVII
ACEITE S. A. E. 40

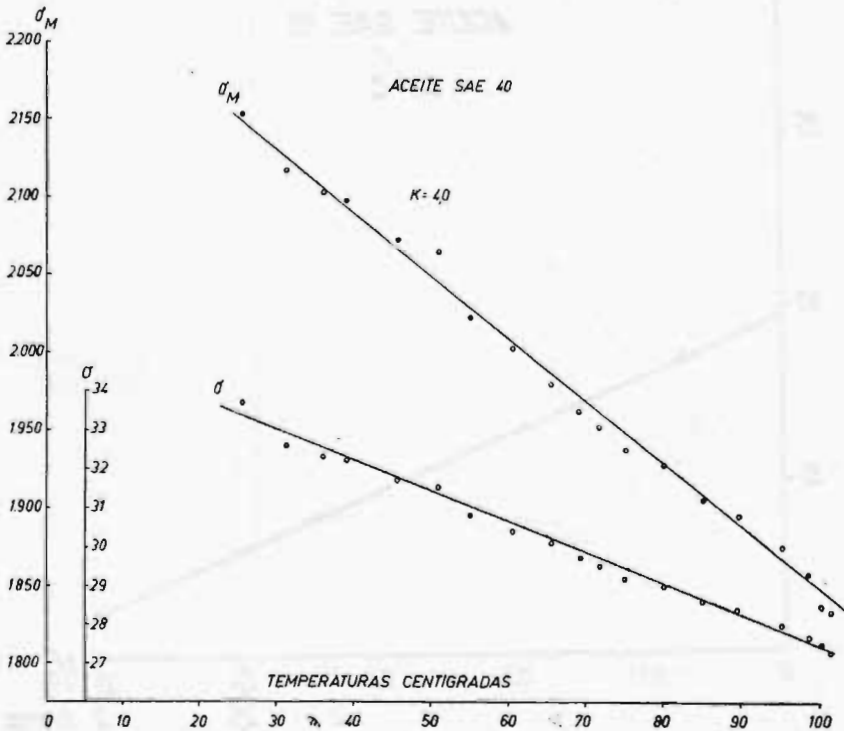
t° C	Tensión superficial	Densidad ortobárica	Tensión superficial molar
	σ	ρ	$\sigma \left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3}$
25,5	33,7	0,8878	2.153,4
31,4	32,6	0,8842	2.117,9
35,8	32,3	0,8814	2.102,7
39,0	32,2	0,8795	2.099,4
45,6	31,7	0,8754	2.073,1
50,8	31,5	0,8722	2.065,1
55,0	30,8	0,8696	2.023,2
60,2	30,4	0,8664	2.001,9
65,2	30,1	0,8633	1.986,8
69,3	29,7	0,8608	1.964,2
71,4	29,5	0,8595	1.953,0
75,0	29,2	0,8573	1.936,5
80,0	29,0	0,8542	1.927,8
85,0	28,6	0,8511	1.905,8
89,8	28,4	0,8481	1.896,9
95,1	28,0	0,8449	1.875,0
98,7	27,7	0,8427	1.858,1
100,4	27,5	0,8416	1.846,2
101,4	27,3	0,8410	1.833,7

K = 4,0 Constante de Eötvös

TABLA XVIII
ACEITE S. A. E.

t° C	Tensión superficial activa	Calor molar de vaporización	Dímetro molecular
	σ_s	L	$d \times 10^8$ cm
25,5	18,7	11.286	10,6
31,4	18,7	11.230	10,5
35,8	19,0	11.178	10,4

39,0	19,1	11.150	10,4
45,6	19,5	11.076	10,2
50,8	19,8	11.022	10,1
55,0	20,0	10.979	10,0
60,2	20,2	10.924	9,9
65,2	20,5	18.873	9,8
69,3	20,7	10.831	9,8
71,4	20,8	10.809	9,7
75,0	21,0	10.772	9,7
80,0	21,2	10.720	9,6
85,0	21,5	10.670	9,5
89,8	21,7	10.620	9,4
95,1	22,0	10.559	9,3
98,7	22,2	10.528	9,3
100,4	22,2	10.510	9,2
101,4	22,3	10.500	9,2



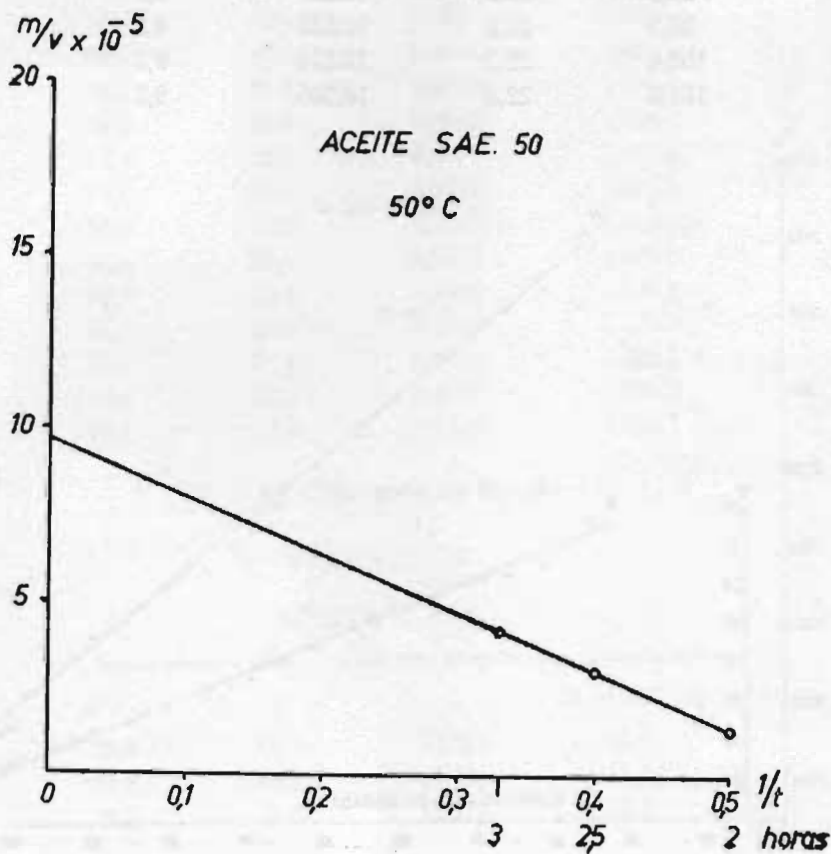
ACEITE LUBRICANTE S. A. E. 50

PESO MOLECULAR MEDIO 409

Valores medios de la pérdida de masa del aceite obtenidos a partir de tres determinaciones por el método del transporte.

Temperatura 50° C

Tiempo empleado	Volumen del gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	606 litros	0,0251 g	0,000041 g/l
2,5 "	586 "	0,0176 "	0,000030 "
2 "	617 "	0,0069 "	0,000011 "

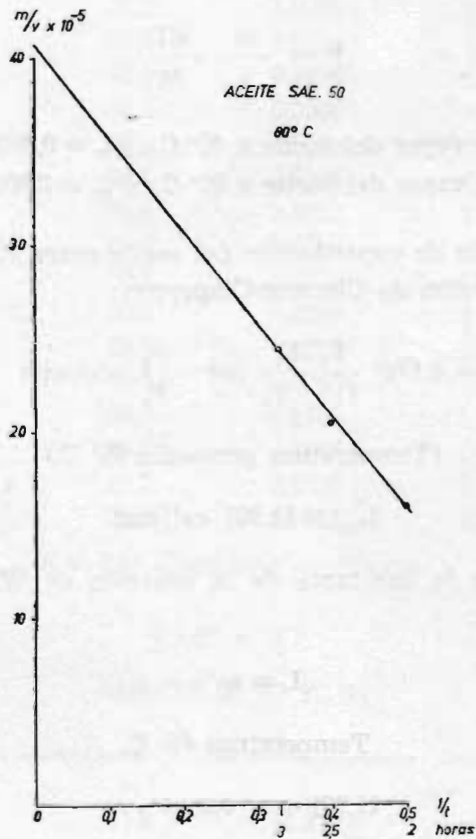


Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica).

$$m/v = 0,000098 \text{ g/l}$$

Temperatura 80° C.

Tiempo empleado	Volumen de gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	600 litros	0,1478 g	0,000246 g/l
2,5 "	597 "	0,1227 "	0,000205 "
2 "	599 "	0,0980 "	0,000163 "



Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica).

$$m/v = 0,00041 \text{ g/l}$$

ACEITE LUBRICANTE S. A. E. 50

PESO MOLECULAR MEDIO 409

Cálculo de las presiones de vapor de acuerdo con la fórmula del transporte:

$$p = \frac{m}{v} \frac{RT}{M}$$

Presión de vapor del aceite a 50° C: $P_{50} = 0,000006 \text{ atm.}$

Presión de vapor del aceite a 80° C: $P_{80} = 0,000029 \text{ atm.}$

Calor medio de vaporización del aceite entre 50° C. y 80° C. según la ecuación de Clausius-Clapeyron:

$$L = 4,576 \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \log \frac{P_2}{P_1} \text{ cal/mol}$$

(Temperatura promedia 65° C.)

$$L_{65} = 11.901 \text{ cal/mol}$$

Cálculo de la constante de la ecuación de W. J. Jones y S. T. Bowden:

$$L = a \rho^{4/3}$$

Temperatura 65° C.

$$11.901 = a \cdot 0,8954^{4/3}$$

$$a = 13.790$$

TABLA XIX
ACEITE S. A. E. 50

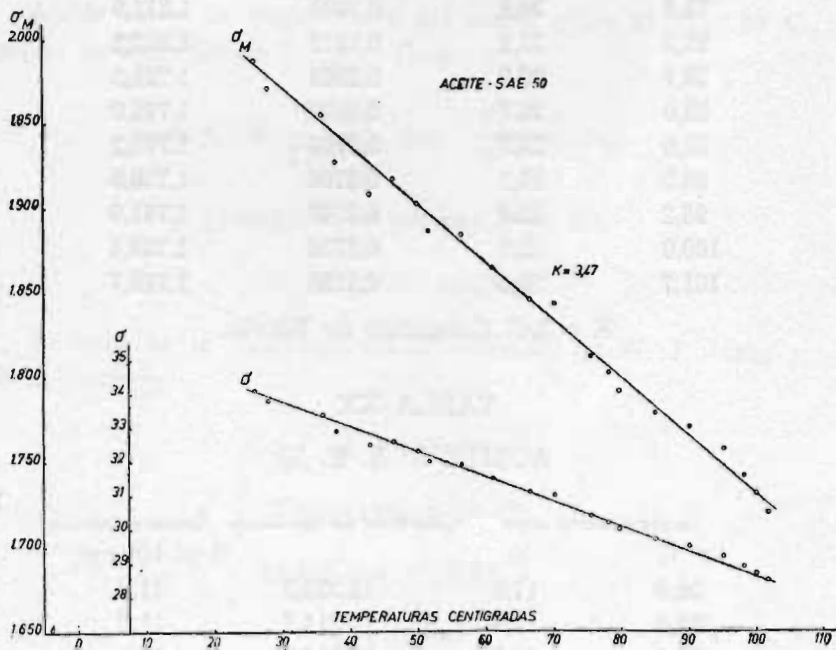
t° C	Tensión superficial	Densidad ortobarica	Tensión superficial molar
	σ	ρ	$\sigma \left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3}$
26,0	34,1	0,9197	1.986,7
28,0	33,8	0,9185	1.971,0
33,4	33,4	0,9132	1.955,1
38,2	32,9	0,9121	1.927,4
43,3	32,5	0,9089	1.908,4
46,6	32,6	0,9069	1.917,2
50,0	32,3	0,9048	1.902,5
51,8	32,0	0,9036	1.886,4
56,6	31,9	0,9006	1.884,6
61,0	31,5	0,8979	1.864,8
66,6	31,1	0,8944	1.845,9
70,2	31,0	0,8922	1.843,0
75,6	30,4	0,8888	1.811,9
78,2	30,2	0,8872	1.802,2
79,7	30,0	0,8862	1.791,5
85,0	29,7	0,8829	1.778,0
90,0	29,5	0,8798	1.770,2
95,2	29,2	0,8766	1.756,5
98,2	28,9	0,8747	1.741,0
100,0	28,7	0,8736	1.730,4
101,7	28,5	0,8725	1.719,7

K = 3,47 Constante de Eötvös.

TABLA XX
ACEITE S. A. E. 50

Tensión superficial activa	Calor molar de vaporización	Díametro molecular
t° C	L	d × 10 ⁸ cm
26,0	12.333,8	11,3
28,0	12.311,7	11,2
36,4	12.216,6	11,1

38,2	18,4	12.197,3	11,0
43,3	18,7	12.143,5	10,9
46,6	18,9	12.102,1	10,8
50,0	19,0	12.069,0	10,8
51,8	19,1	12.046,9	10,8
56,6	19,4	11.991,8	10,7
61,0	19,6	11.944,9	10,6
66,6	19,8	11.881,5	10,5
70,2	20,0	11.845,6	10,4
75,6	20,3	11.783,6	10,3
78,2	20,4	11.756,0	10,3
79,7	20,5	11.736,7	10,2
85,0	20,7	11.680,1	10,1
90,0	20,9	11.626,3	10,1
95,2	21,2	11.568,4	10,0
98,2	21,4	11.533,9	9,9
100,0	21,5	11.516,0	9,9
101,7	21,5	11.499,5	9,9



ACEITE LUBRICANTE S. A. E. 60

PESO MOLECULAR MEDIO 510

Valores medios de la pérdida de masa del aceite obtenidos a partir de tres determinaciones por el método del transporte:

Temperatura 50° C

Tiempo empleado	Volumen de gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	596 litros	0,0054 g	0,000009 g/l
2,5 "	595 "	0,0035 "	0,000006 "
2 "	598 "	0,0014 "	0,000002 "

Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica).

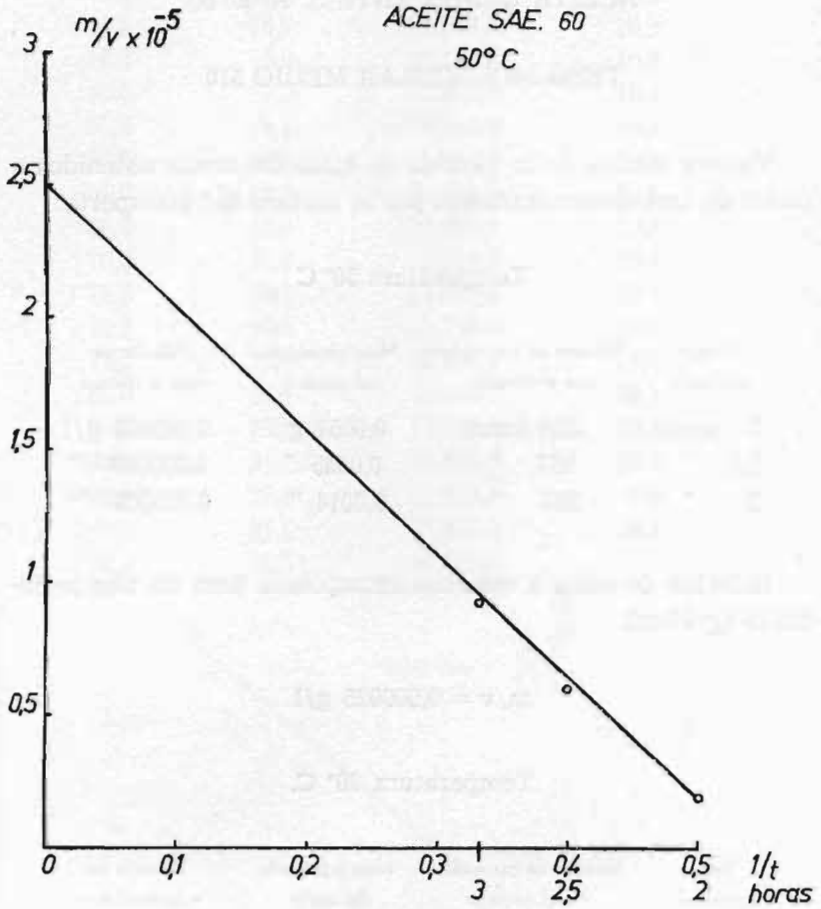
$$m/v = 0,000025 \text{ g/l}$$

Temperatura 80° C.

Tiempo empleado	Volumen de gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	594 litros	0,0163 g	0,000027 g/l
2,5 "	599 "	0,0106 "	0,000018 "
2 "	600 "	0,0058 "	0,000010 "

Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica).

$$m/v = 0,000066 \text{ g/l}$$



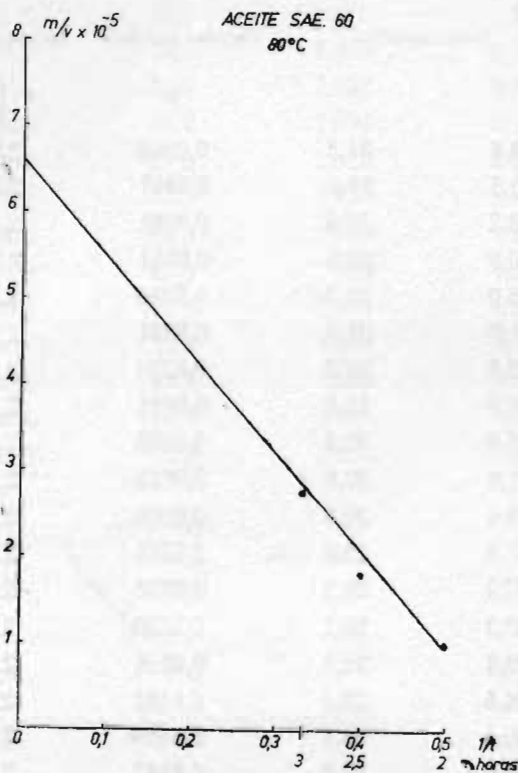
ACEITE LUBRICANTE S. A. E. 60
PESO MOLECULAR MEDIO 510

Cálculo de las presiones de vapor de acuerdo con la fórmula del transporte:

Presión de vapor de aceite a 50° C.: $P_{50} = 0,0000013$ atm.

Presión de vapor de aceite a 80° C.: $P_{80} = 0,0000037$ atm.

Calor medio de vaporización de aceite entre 50° C. y 80° C. según la ecuación de Clausius-Clapeyron:



(Temperatura promedia 65° C.)

$$L_{65} = 7.901 \text{ cal/mol}$$

Cálculo de las constantes de la ecuación de W. J. Jones y S. T. Bowden:

$$L = a\rho^{1/3}$$

(Temperatura 65° C.)

$$7.901 = a \cdot 0,8664^{1/3}$$

$$a = 9.565$$

TABLA XXI
ACEITE S. A. E. 60

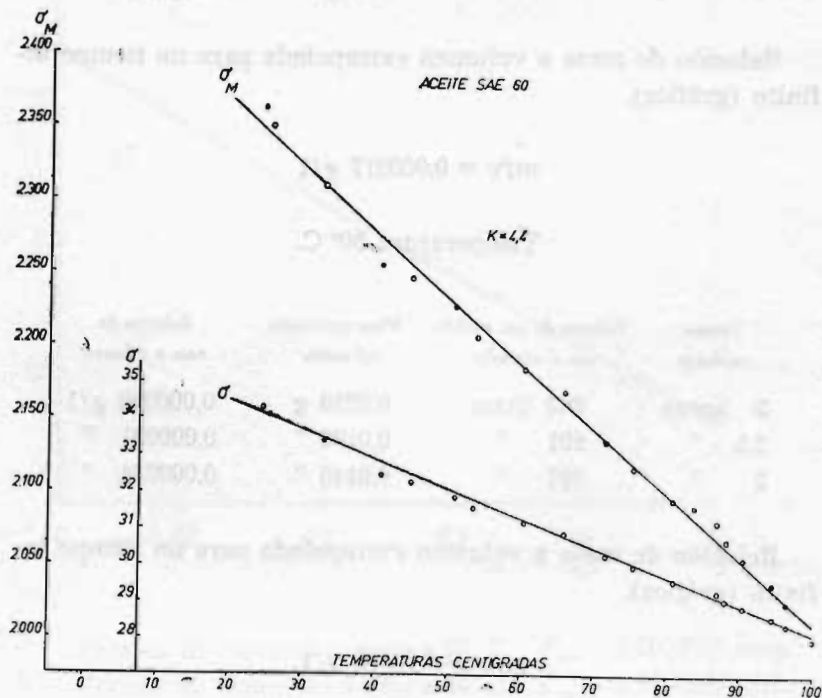
t° C	Tensión superficial	Densidad ortobárica	Tensión superficial molar
	σ	ρ	$\sigma \left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3}$
24,4	34,3	0,8916	2.363,5
25,8	34,1	0,8907	2.351,3
33,2	33,4	0,8861	2.311,0
40,8	32,5	0,8814	2.256,7
45,0	32,3	0,8788	2.247,2
51,0	31,9	0,8751	2.225,7
53,7	31,6	0,8734	2.207,6
60,6	31,2	0,8691	2.186,8
66,0	30,9	0,8658	2.171,3
71,8	30,3	0,8622	2.135,1
75,4	30,0	0,8600	2.117,6
81,0	29,6	0,8565	2.095,0
87,0	29,3	0,8528	2.079,8
88,3	29,1	0,8520	2.066,9
90,8	28,9	0,8504	2.055,2
94,5	28,6	0,8481	2.037,5
96,4	28,4	0,8469	2.025,1
100,0	28,0	0,8447	2.000,1

K = 4,40 Constante de Eötvös

TABLA XXII
ACEITE S. A. E. 60

t° C	Tensión superficial activa	Calor molar de vaporización	Diámetro molecular
	σ_s	L	d $\times 10^8$ cm
24,4	19,0	8.209	8,8
25,8	19,1	8.196	8,8
33,2	19,4	8.141	8,7

40,8	19,8	8.082	8,6
45,0	20,1	8.052	8,5
51,0	20,4	8.011	8,4
53,7	20,5	7.986	8,3
60,6	20,9	7.933	8,2
66,0	21,2	7.891	8,1
71,8	21,5	7.849	8,0
75,4	21,7	7.823	8,0
81,0	22,0	7.782	7,9
87,0	22,3	7.733	7,8
88,3	22,3	7.725	7,8
90,8	22,5	7.706	7,8
94,5	22,7	7.681	7,7
96,4	22,8	7.667	7,7
100,0	23,0	7.637	7,6



ACEITE LUBRICANTE S. A. E. 70

PESO MOLECULAR MEDIO 616

Valores medios de la pérdida de masa del aceite obtenido a partir de tres determinaciones por el método del transporte.

Temperatura 50° C.

Tiempo empleado	Volumen de gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	600 litros	0,0049 g	0,000008 g/l
2,5 "	601 "	0,0030 "	0,000005 "
2 "	600 "	0,0017 "	0,000003 "

Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica).

$$m/v = 0,000017 \text{ g/l}$$

Temperatura 80° C.

Tiempo empleado	Volumen de gas medido con el contador	Masa vaporizada del aceite	Relación de masa a volumen
3 horas	603 litros	0,0219 g	0,000036 g/l
2,5 "	601 "	0,0190 "	0,000031 "
2 "	597 "	0,0145 "	0,000024 "

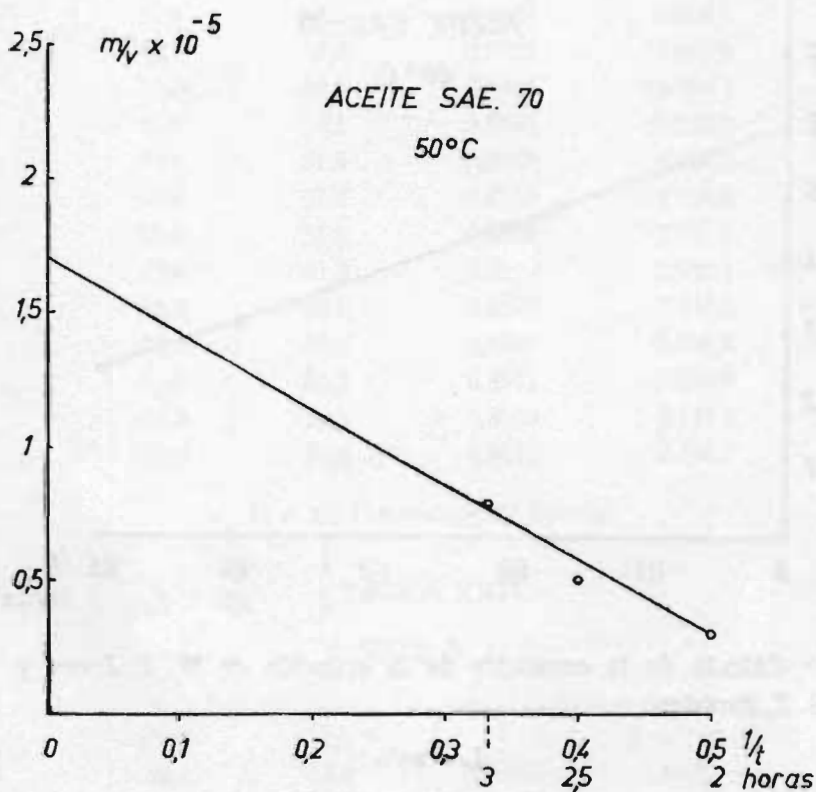
Relación de masa a volumen extrapolada para un tiempo infinito (gráfica).

$$m/v = 0,00006 \text{ g/l}$$

ACEITE LUBRICANTE S. A. E. 70

PESO MOLECULAR MEDIO 616

Cálculo de las presiones de vapor de acuerdo con la fórmula del transporte:



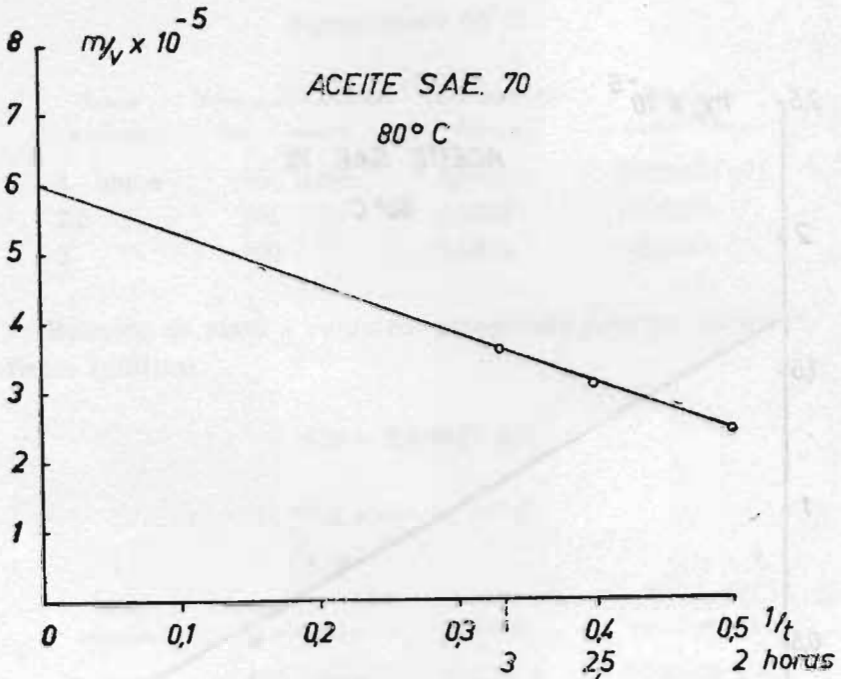
Presión de vapor del aceite a 50° C.: $P_{50} = 0,0000007$ atm.

Presión de vapor del aceite a 80° C.: $P_{80} = 0,0000028$ atm.

Calor medio de vaporización del aceite entre 50° C. y 80° C. según la ecuación de Clausius-Clapeyron:

(Temperatura promedio 65° C.)

$$L_{65} = 10.471 \text{ cal/mol}$$



Cálculo de la constante de la ecuación de W. J. Jones y S. T. Bowden:

$$L = a\rho^{4/3}$$

Temperatura 65° C.

$$10.471 = a \cdot 0.873^{4/3}$$

$$a = 12.559$$

TABLA XXIII
ACEITE S. A. E. 70

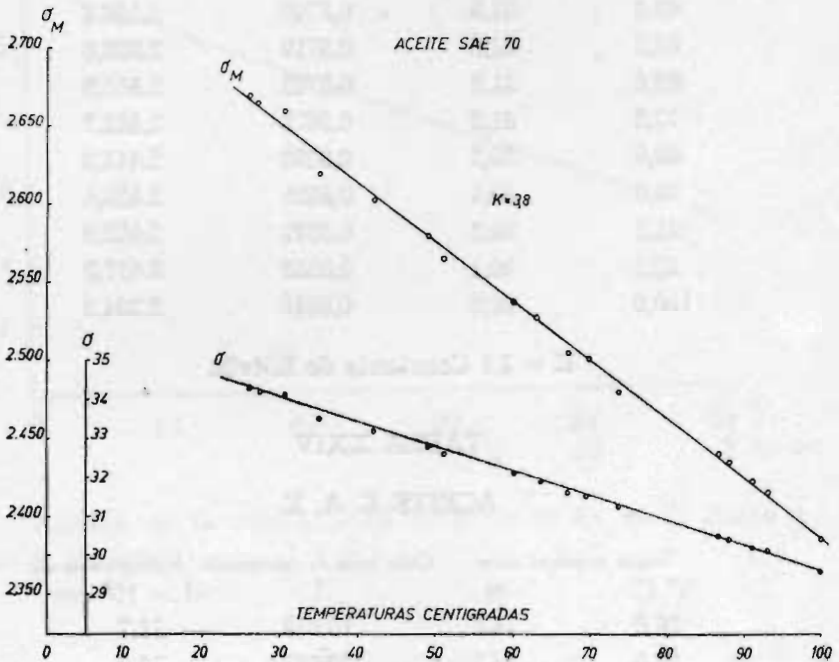
Tensión superficial	Densidad ortobárica	Tensión superficial molar	
t° C	σ	ρ	
		$\sigma \left(\frac{M}{\rho} \right)^{2/3}$	
26,0	34,3	0,8966	2.670,5
27,4	34,2	0,8958	2.664,4
30,6	34,1	0,8938	2.660,5
35,0	33,5	0,8912	2.618,8
42,4	33,2	0,8867	2.604,1
49,3	32,8	0,8825	2.580,9
51,0	32,6	0,8815	2.567,2
60,0	32,1	0,8760	2.538,2
63,4	31,9	0,8740	2.526,4
66,8	31,6	0,8719	2.506,6
69,6	31,5	0,8702	2.501,9
73,6	31,2	0,8678	2.482,7
86,6	30,5	0,8599	2.441,8
88,0	30,4	0,8591	2.435,4
91,2	30,2	0,8571	2.423,0
93,2	30,1	0,8559	2.417,3
100,0	29,6	0,8518	2.384,8

K = 3,8 Constante de Eötvös.

TABLA XXIV
ACEITE S. A. E.

Tensión superficial activa	Calor molar da vaporización	Diámetro molecular	
t° C	σ_s	L	
		d $\times 10^8$ cm	
26,0	14,6	10.858	11,7
27,4	14,7	10.845	11,6
30,6	14,8	10.812	11,6
35,0	15,0	10.771	11,5

42,4	15,3	10.698	11,3
49,3	15,6	10.631	11,2
51,0	15,6	10.615	11,1
60,0	16,0	16.526	10,9
63,4	16,1	10.494	10,9
66,8	16,3	10.461	10,8
69,6	16,4	10.434	10,7
73,6	16,5	10.395	10,7
86,6	17,0	10.269	10,4
83,0	17,1	10.257	10,4
91,2	17,2	10.225	10,4
93,2	17,3	10.206	10,3
100,0	17,6	10.141	10,2



ENERGIAS DE ADHESION DE LOS ACEITES LUBRICANTES
RESPECTO DE LOS METALES ANTIFRICCION A LA TEM-
PERATURA DE 25° C.

Estos valores expresados en dina/cm. están calculados con la fórmula de la energía de adhesión $\sigma_A (1 + \cos \theta)$; donde la tensión superficial σ_A se ha sacado a 25° C. de las gráficas trazadas a partir de los valores obtenidos con el aparato de Lecomte de Noüy. Por otra parte, los valores de $\cos \theta$ son los obtenidos con el medidor de lubricación de Richard von Dallwitz-Wegner.

TABLA XXV

ZAMAK 5

Tipo de aceite	Energía de adhesión
Aceite parafina	56,92
SAE 10	53,58
SAE 20	56,41
SAE 30	56,39
SAE 40	57,01
SAE 50	61,11
SAE 60	60,42
SAE 70	60,25

ZAMAK 3

Aceite parafina	60,07
SAE 10	57,52
SAE 20	58,15
SAE 30	57,76
SAE 40	57,57
SAE 50	60,57
SAE 60	58,64
SAE 70	58,10

ZAMAK 2

Tipo de aceite	Energía de adhesión
Aceite parafina	51,56
SAE 20	52,37
SAE 30	59,26
SAE 40	55,81
SAE 50	58,63
SAE 60	58,91
SAE 70	56,60

BRONCE

Aceite parafina	58,27
SAE 10	60,02
SAE 20	58,29
SAE 30	57,89
SAE 40	58,64
SAE 50	55,96
SAE 60	60,15
SAE 70	59,44

BRONCE FOSFOROSO

Aceite parafina	57,60
SAE 10	57,39
SAE 20	55,87
SAE 30	56,68
SAE 40	58,37
SAE 50	58,63
SAE 60	62,07
SAE 70	58,89

AUTO R

Tipo de aceite	Energía de adhesión
Aceite parafina	55,45
SAE 10	57,66
SAE 20	57,09
SAE 30	55,30
SAE 40	55,01
SAE 50	58,62
SAE 60	57,13
SAE 70	61,07

AUTO

Aceite parafina	56,39
SAE 10	56,96
SAE 20	59,10
SAE 30	59,39
SAE 40	57,70
SAE 50	54,73
SAE 60	57,81
SAE 70	61,91

TREFF

Aceite parafina	58,15
SAE 10	56,82
SAE 20	57,75
SAE 30	53,55
SAE 40	57,43
SAE 50	54,84
SAE 60	57,52
SAE 70	60,38

CORR

Tipo de aceite	Energía de adhesión
Aceite parafina	54,49
SAE 10	56,27
SAE 20	57,49
SAE 30	56,54
SAE 40	59,32
SAE 50	54,97
SAE 60	60,15
SAE 70	58,48

HIERRO

Aceite parafina	58,58
SAE 10	57,10
SAE 20	57,89
SAE 30	55,30
SAE 40	59,06
SAE 50	57,21
SAE 60	59,46
SAE 70	59,57

AUTO AD

Aceite parafina	52,91
SAE 10	58,48
SAE 20	57,09
SAE 30	55,30
SAE 40	57,30
SAE 50	55,68
SAE 60	57,68
SAE 70	55,47

BABBITT

Tipo de aceite	Energía de adhesión
Aceite parafina	52,86
S A E 10	53,06
S A E 20	53,85
S A E 30	53,94
S A E 40	55,01
S A E 50	57,23
S A E 60	56,04
S A E 70	56,71

MICROGRAFIAS DE PROBETAS

Las micrografías de las probetas de los metales antifricción fueron realizadas con un microscopio Universal Me F REICHERT n.º 265.121. Microscopio de construcción invertida con cámara a fuelle incorporada para formato 9×12 cm. (Fig. 10).

Los objetivos y oculares empleados fueron:

Objetivos.

Epilum acromáticos secos:

	8 : 1	A = 0,15
	16 : 1	A = 0,25
	32 : 1	A = 0,40
	45 : 1	A = 0,65
	65 : 1	A = 0,65
Inmersión:	85 : 1	A = 0,95
Fluorita seco:	85 : 1	A = 0,85
Inmersión:	140 : 1	A = 1,30

Oculares.

Planos: $5 \times 8 \times 12,5$

Huyghens: $6 \times 10 \times 16$.

Las superficies pulidas fueron logradas mediante pulido mecánico y electrolítico (39).

Para el pulido mecánico ha sido empleado óxido de magnesio y alúmina levigada sobre paños de la casa Buchler Ltd., marcas SELVIT, MIRACLOTH, SILK, VELVET y BILLIARD.

Para el pulido electrolítico fué empleada la electropulidora DISA-ELECTROPOL, modelo 53-B.

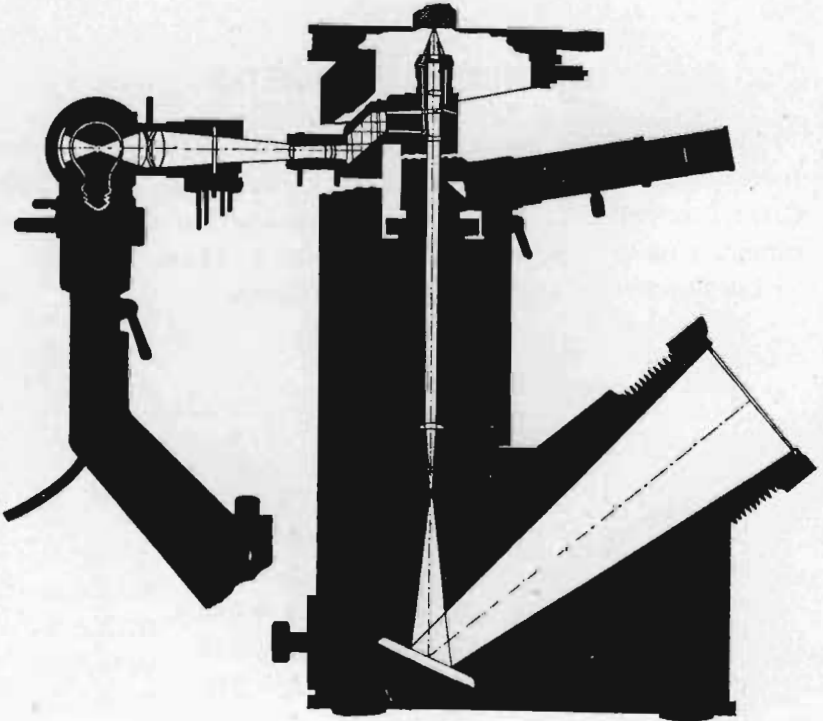


Fig. 10



Placa I

FUNDICION GRIS.—Sin análisis.

ATAQUE.—Electrolítico (200 gr. ácido crómico; 1.000 ml. agua).

AUMENTOS.— $\times 700$

ESTRUCTURA.—Grafito laminar, matriz perlítica y eutéctico fosforoso

FUNDICION GRIS

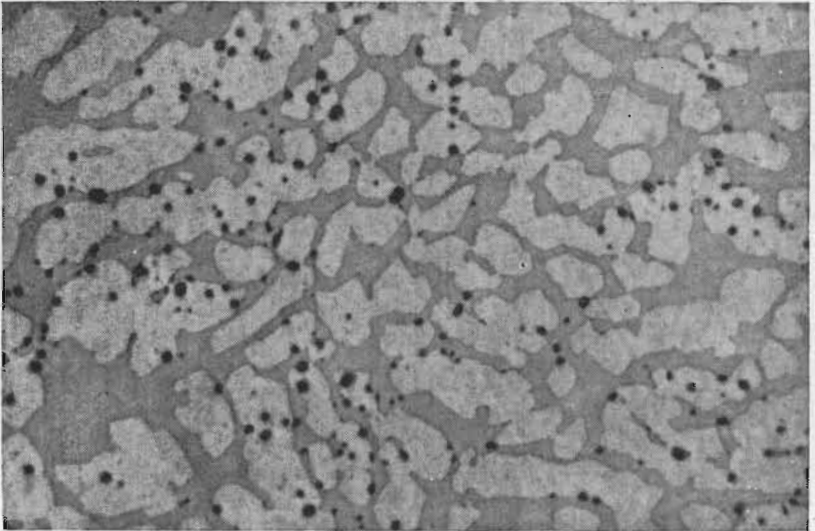
Las bandas oscuras de la micrografía corresponden al grafito laminar (arrancado durante el pulido y el ataque).

La separación del grafito en forma de láminas o rosetas para dar origen a las fundiciones grises se favorece por la presencia de silicio que provoca la descomposición de la cementita en hierro y grafito. Una velocidad de enfriamiento lenta provoca también la separación del grafito.

La matriz, con estructura típica de eutectoide, corresponde al eutectoide hierro-cementita, conocido por el nombre de perlita, con un contenido en carbono de 0,83%.

En este material se observan, en pequeña proporción, algunas zonas de eutéctico fosforoso. El fósforo se añade a las fundiciones para darles mejor colabilidad a causa del bajo punto

de fusión eutéctico (960° C.), que está constituido en las fundiciones grises por solución sólida de fósforo en hierro α y fósforo de hierro (Fe_3P).



Placa II

BRONCE.—(Zn = 12,05%; Pb = 1,83%; Fe = 0,86%; Cu = 79,81%;
Sn = 5,05%; As = 0,12%; Sb = 0,30%)

ATAQUE.—Cloruro férrico (5 g. Cl_3Fe ; 50 ml. ClH conc.; 100 ml. de agua).

AUMENTO.— $\times 300$.

ESTRUCTURA.—Fase α más glóbulos de plomo.

BRONCE

En la figura 11 se representa la isoterma a 500° C. del diagrama de equilibrio cobre-estaño-cinc. La composición del bronce estudiado cae entre la línea punteada y la línea llena que indican los límites α y $\alpha + \gamma$ a 300° C. y 500° C. respectivamente, pero la disminución en solubilidad a 300° C. solamente ocurre después de recocidos extremadamente largos de probetas fuertemente deformadas. Puede considerarse que la línea de 500° C. representa la solubilidad efectiva.

En este caso, nos encontramos con una solución sólida α . La diferente coloración (ver placa II) se debe a las distintas composiciones de la parte de solidificación primaria y aquella de solidificación posterior.

El cinc se añade a estas aleaciones porque facilita la colada y disminuye el precio. La plasticidad y la dureza aumentan, pero las cualidades de frotamiento disminuyen. Entra en solución sólida en el cobre y disminuye la proporción de constituyente γ .

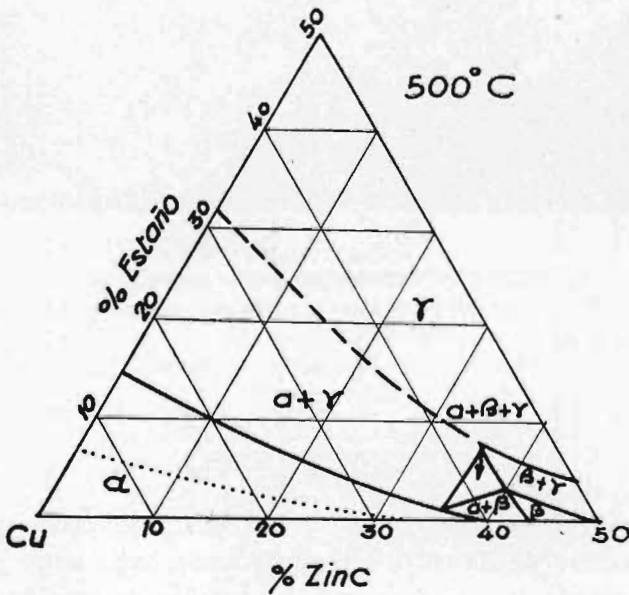
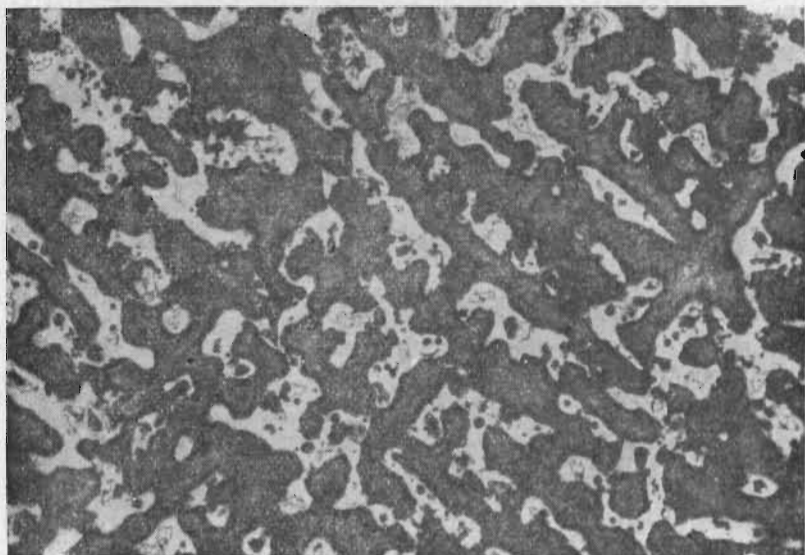


Fig. 11.

El plomo que se aísla en pequeños glóbulos como se aprecia en la placa, facilita la mecanización, aumenta la plasticidad y mejora las propiedades de auto-lubricación.



Placa III

FRONCE FOSFOROSO.—Sin análisis.

ATAQUE.—(Partes iguales de hidróxido amónico y peróxido de hidrógeno).

AUMENTOS.— $\times 150$.ESTRUCTURA.—Dendritas de fase α nucleadas más eutectoide $\alpha + \delta$ (fondo oscuro).

BRONCE FOSFOROSO

La característica más notable de las aleaciones cobre-estaño, es la velocidad de difusión extremadamente lenta entre el cobre y el estaño lo que hace que los estados de equilibrio no aparezcan sino después de períodos largos de recocido.

La fase α , que solidifica primero es cobre casi puro y las porciones de posterior solidificación se van enriqueciendo en estaño. Al no homogeneizarse por difusión, adquiere una apariencia de núcleo envuelto por una cáscara.

El eutéctico $\alpha + \delta$ que debía presentarse, en condiciones de equilibrio, para contenidos de estaño superiores al 14%, (véase fig. 12) puede aparecer con contenidos tan pequeños como del

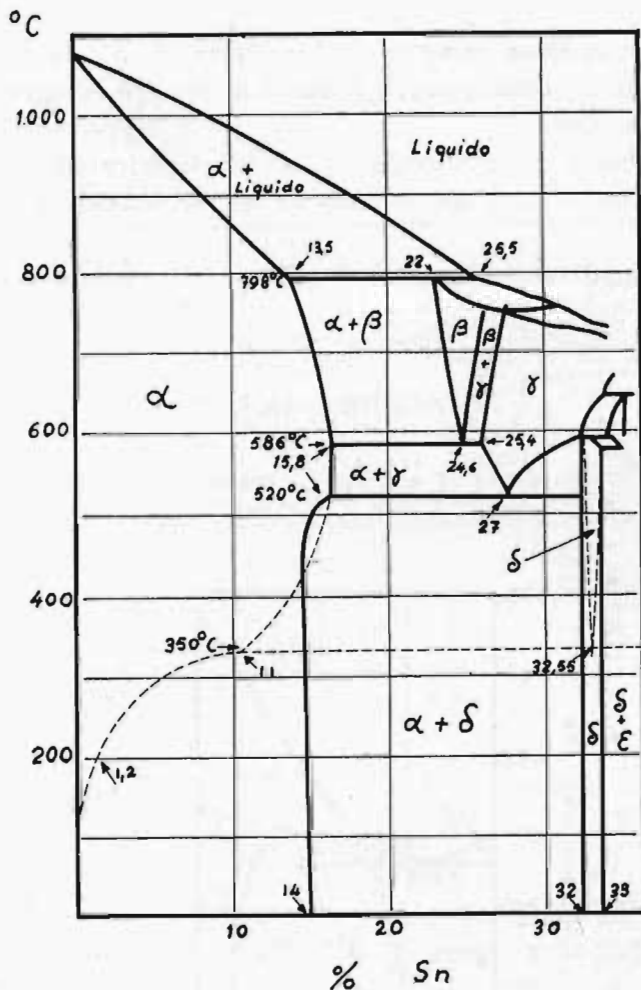


Diagrama de equilibrio cobre - estaño

Fig. 12

5% de estaño si la velocidad de enfriamiento es suficientemente rápida. Puede decirse que el límite $\alpha/\alpha + \delta$ es función de la velocidad de enfriamiento, pudiendo adoptar la posición indicada por la línea de puntos.

El fósforo se añade como desoxidante para evitar la formación de óxido de estaño, cuya presencia disminuye la ductilidad de la aleación.

La estructura de la micrografía es característica de estas aleaciones directamente solidificadas en los moldes después de la colada.

La fase α (clara) aparece rodeada de una cáscara (oscura) y a continuación el eutéctico $\alpha + \delta$.

LAS ALEACIONES ZAMAK

La fig. 13 representa la sección de contenido constante en cinc (93% Zn) del diagrama ternario Al - Cu - Zn.

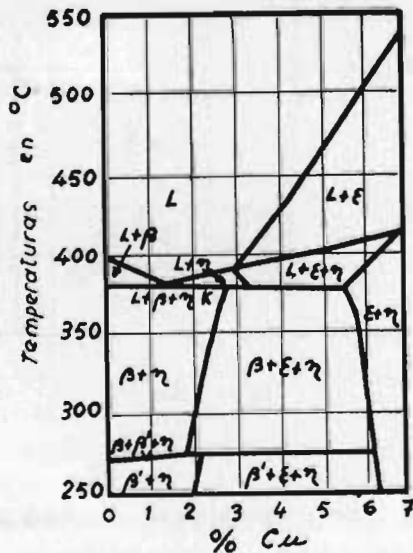


Diagrama con contenido constante de 93% Zn

Fig. 13

La fig. 14 representa el diagrama binario Zn - Al.

En la fig. 15 se representa una sección de contenido constante en cobre.

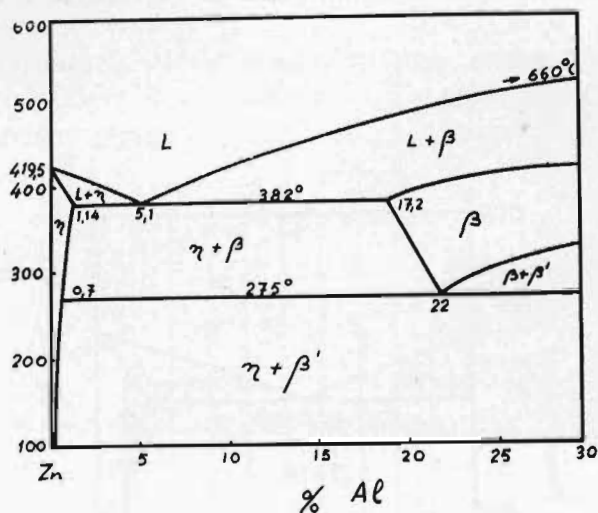


Diagrama binario Zinc - Aluminio

Fig. 14.

Estos diagramas, publicados en el Noticiario Técnico MONTEVECCHIO en Septiembre de 1951 y Marzo de 1952, nos proporcionan una buena guía para la interpretación metalográfica.

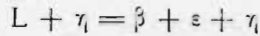
ZAMAK 2 (PLACA IV)

Siguiendo la fig. 13 vemos que para el contenido en cobre de 2,84% nos encontramos que al enfriar el líquido entra en contacto con el campo L + γ separándose por tanto la fase γ (solución sólida rica en zinc) a unos 395° C.

A unos 385° C. se comienza a separar del líquido la fase ξ (solución sólida de zinc y cobre (12% Cu) y la fase β (esta fase es

una solución sólida de cinc y aluminio que existe por encima de 275° C).

Finalmente todo el líquido desaparece por la reacción.



Con un posterior enfriamiento la fase β se transforma en $\beta' + \eta$; esta reacción es lenta, necesitando un cierto período de tiempo y es responsable del fenómeno del envejecimiento.

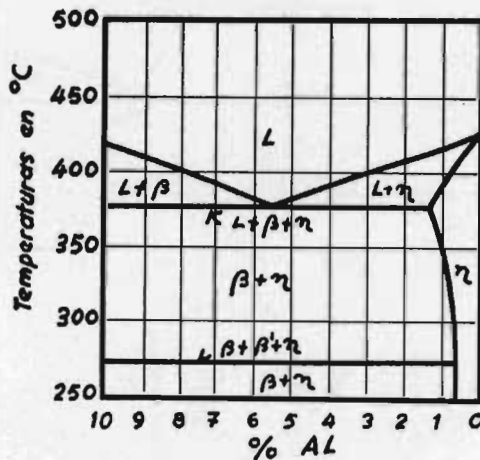
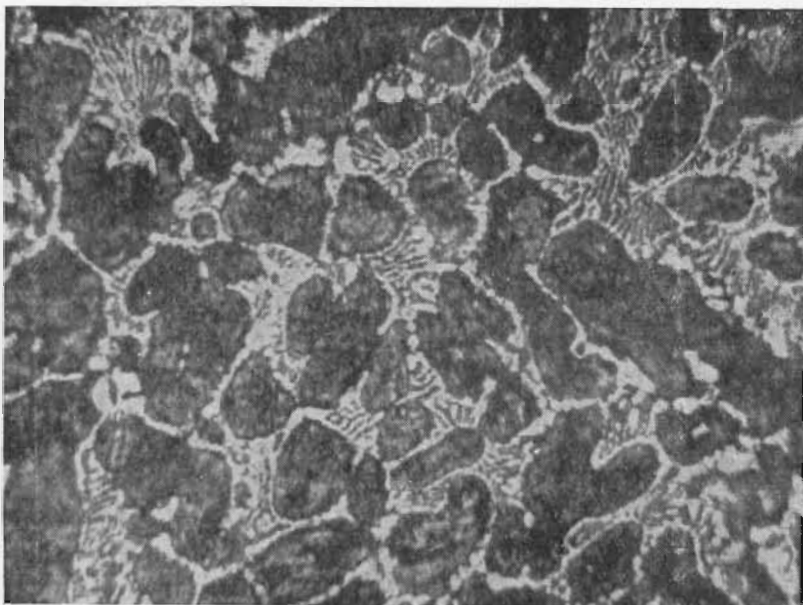


Diagrama con contenido constante de 1% Cu

Fig. 15.

Así pues la estructura de equilibrio queda en $\eta + \varepsilon + \beta'$.

Como al separarse los cristales η la composición del líquido tiende hacia el eutéctico se separan el resto de las fases formando una estructura tipo eutéctico. Podemos pues resumir diciendo que existen los cristales primarios η (oscuros en la placa IV) mas el eutéctico ternario formado por cristales $\eta + \varepsilon + \beta'$.



Placa IV

ZAMAK 2.—(Al=4,30%; Pb=0,0011%; Cu=2,84%; Cd=0,0001%;
Zn=92,81%; Fe=0,019%; Mg=0,032%)

ATAQUE.—Reactivo Palmerton (200 g. CrO₃; 15 g. SO₄Na₂;
1.000 ml. agua).

AUMENTOS.—×750.

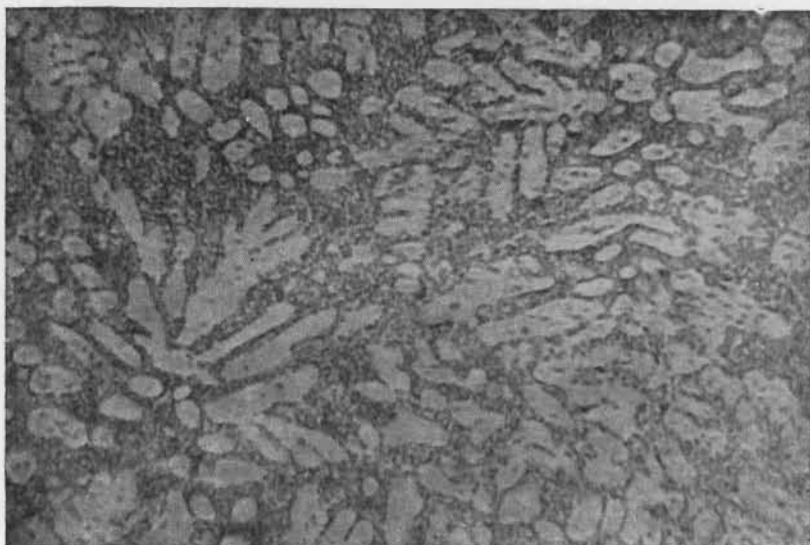
ESTRUCTURA.—Fase γ (oscura) + eutéctico ternario ($\gamma + \beta' + \epsilon$)

ZAMAK 3

La estructura de esta aleación, (placa V) queda aclarada por una inspección de la fig. 14. Está constituida por cristales primarios γ (claros en la placa) embebidos en una matriz de $\gamma + \beta'$ si el envejecimiento es completo o bien de γ y β que se está descomponiendo según la reacción $\beta = \beta' + \gamma$.

ZAMAK 5

En esta aleación tiene lugar un proceso similar al que ocurre en el Zamak 2, sin separación de la fase ϵ por tener un contenido insuficiente de cobre.



Placa V

ZAMAK 3.—(Al=4,28%; Pb=0,0011%; Cu=0,0067%; Cd=0,0007%;
Zn=95,67%; Fe=0,005%; Mg=0,033%)

ATAQUE.—Electrolítico (85 ml. ácido perclórico; 800 ml. alcohol etílico;
115 ml. agua).

AUMENTOS.—× 750.

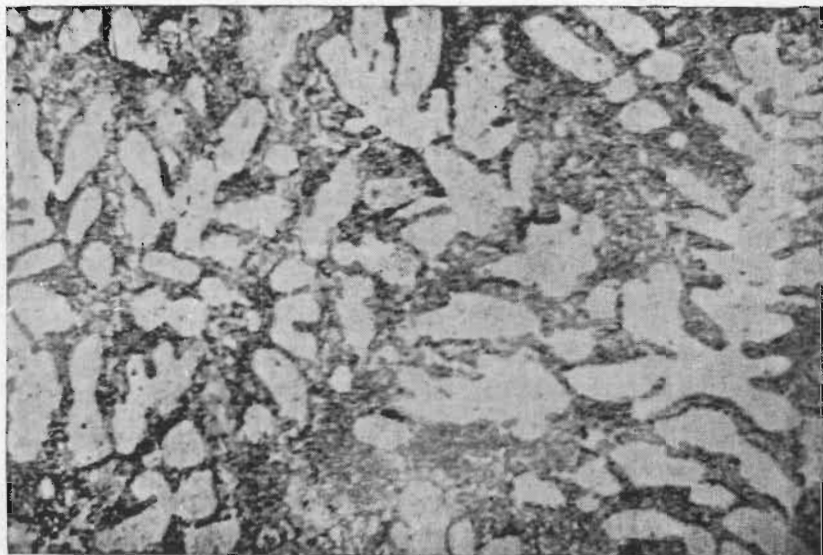
ESTRUCTURA.—Cristales primarios de $\gamma_1 + \beta'$

Con ayuda de la fig. 15 puede estimarse que la estructura estará formada por cristales primarios γ_1 embebidos en una matriz formada por cristales $\gamma_1 + \beta'$ (placa VI).

ALEACIONES PLOMO ANTIMONIO ESTAÑO - COBRE

En este grupo de aleaciones antifricción podemos considerar cuatro categorías:

- 1.^a) Aleaciones base estaño, conteniendo del 65 al 92% de estaño.
- 2.^a) Aleaciones base plomo; contienen como máximo 33% de estaño y plomo en mayor proporción.



Placa VI

ZAMAK 5.—(Zn=94.76% ; Al=4.30% ; Pb=0.0012% ; Cu=0.90% ;
Cd=0.0008% ; Fe=0.007% ; Mg=0.031%).

ATAQUE.—Reactivo Palmerton (200 g. CrO₃ ; 15 g. SO₄Na₂ ;
1.000 ml. agua).

AUMENTOS.—× 750.

ESTRUCTURA.—Cristales primarios de γ₁ más matriz γ₂ y β¹

3.^a) Aleaciones conteniendo de 22 a 55% de plomo y 33 a 60% de estaño.

4.^a) Aleaciones estaño-antimonio-cobre.

Entre las aleaciones estudiadas pertenecen a la categoría 2.^a las probetas AUTO R. BABBITT y TREFF, a la categoría 3.^a las AUTO y CORR, y a la categoría 4.^a la AUTO D.

En estas aleaciones, y dependiendo de la proporción de cada uno de los componentes pueden formarse distintas fases, compuestos intermetálicos y eutécticos.

Se presentan las siguientes fases:

Fase α.—Está formada por antimonio en el que se ha disuelto el resto de los elementos hasta su límite de solubilidad.

Fase γ .—Como la anterior es la solución sólida rica en estaño.

Fase δ .—Es la solución sólida rica en plomo.

Entre los compuestos intermetálicos se presentan los siguientes:

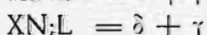
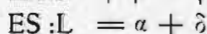
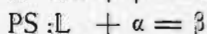
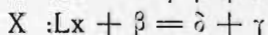
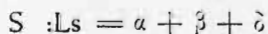
Compuesto β .—Es el compuesto SbSn que aparece en forma de cubos y cuyo tamaño y aspecto dependen de la velocidad de enfriamiento y de la temperatura de colada.

Compuesto γ .—Es el compuesto Cu_6Sn_3 que aparece en forma de agujas o estrellas.

Compuesto ξ .— Cu_2Sb aparece en forma de agujas largas.

Los eutécticos Pb-Sb-Sn han sido estudiados por Weaver, Iwasé y Aoki (40).

En el diagrama, fig. 16, se señalan los puntos invariantes y las líneas límite en las cuales tienen lugar las siguientes reacciones:



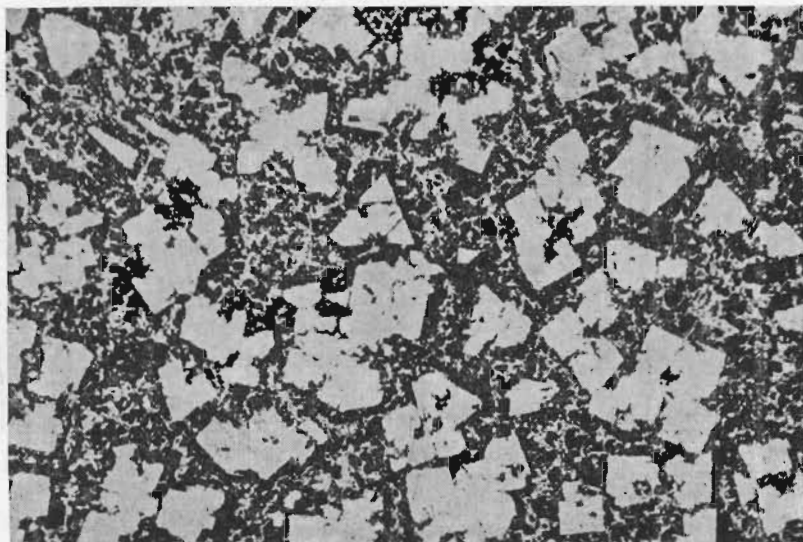
La situación de los puntos X, S y M ha sido estudiada por distintos investigadores, y los resultados se resumen en la tabla XXVI.

TABLA XXVI

PUNTO	INVESTIGADOR	AÑO	PORCENTAJE		
			ANTIMONIO	PLOMO	TEMPERATURA
Eutéctico S	Iwasé y Aoki	3,5	11,5	85,0	240 °C
	Weaver	4,0	12,0	84,0	259 °C
Ponéctico X	Loebe	60,5	3,0	36,5	191 °C
	Campbell and Elder	57,5	2,5	40,0	189 °C
	Heyn y Bauer	53,5	4,0	42,5	184 °C
	Iwasé y Aoki	57,5	2,5	40,0	189 °C
Seudo-binario	Iwasé y Aoki	10,0	10,0	80,0	245 °C
Eutéctico M	Weaver	10,0	10,0	80,0	246,5 °C

Para cada una de las micrografías hemos utilizado la nomenclatura anteriormente indicada.

En la probeta AUTO R, placa VII, se presenta el compuesto



Placa VII

PROBETA AUTO R.—(Pb=50,33%; Fe=0,06%; Cu=2,28%;

Sn=30,19%; As=0,01%; Sb=17,17%).

ATAQUE.—Nital al 2%.

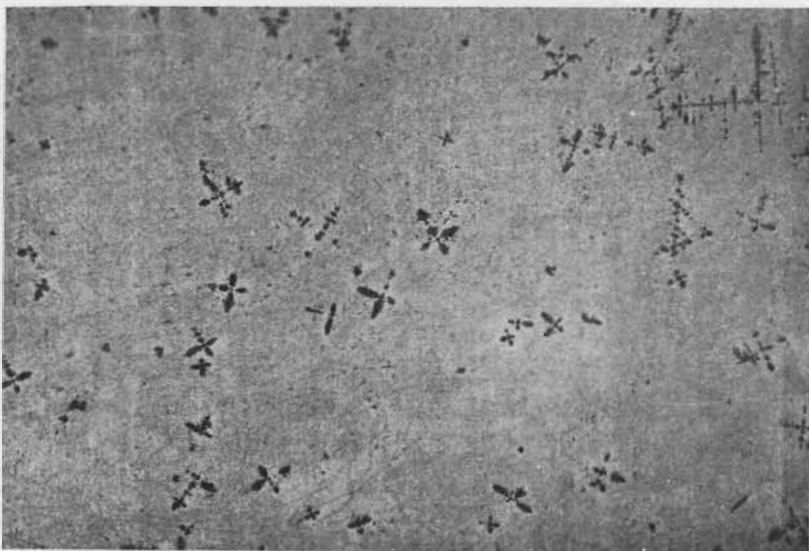
AUMENTOS.— $\times 75$.

ESTRUCTURA.—Compuesto de β (cubos) + eutéctico S.

β no bien formado y el eutéctico S mal definido, lo cual es síntoma de temperatura de colada baja y enfriamiento rápido.

Las placas VIII-a y VIII-b corresponden a la probeta BABBITT. En la primera se ha tomado una micrografía de conjunto (11 aumentos) y puede apreciarse la proporción en que se presenta la fase δ . En la VIII-b se ha revelado la estructura del eutéctico M.

La placa IX corresponde a la probeta TREFF en la que se ve el compuesto β bien formado y el eutéctico S bien resuelto, indicación de temperatura de colada y enfriamiento correctos.



Placa VIII-a

PROBETA BABBITT.—(Pb=80,51% ; Fe=0,001% ; Cu=0,27% ;
Sn=9,72% ; As=Trazas ; Sb=9,50%).

ATAQUE.—Sin ataque.

AUMENTOS.— $\times 11$.

ESTRUCTURA.—Dendritas de fase δ en pequeña proporción y matriz de eutéctico pseudo-binario M.

En la placa X puede verse el compuesto β , el eutéctico S y una gran aguja del compuesto ξ ; y resaltando entre el eutéctico pequeñas inclusiones de compuesto γ .

En la placa XI se ve el compuesto γ formado en gran parte en el interior del compuesto β .

El compuesto γ aparece en mayor proporción en la probeta AUTO A-D que contiene más cobre, como puede verse en la placa XII.

CONCLUSIONES

1.^a) En este trabajo de investigación, se ha estudiado en primer lugar, el comportamiento físico de una serie de muestras

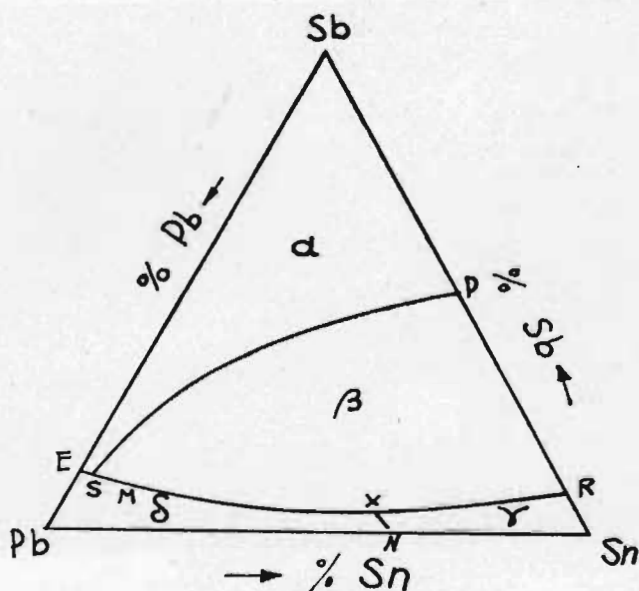


Diagrama ternario Plomo-Antimonio-Estano

Fig. 16.

de aceites lubricantes para motores de combustión interna, de los tipos señalados por la clasificación internacional S. A. E., logrados en el comercio sin la garantía de que procedan de un mismo crudo de petróleo, habiéndose adoptado como aceite patrón de referencia el aceite neutro de parafina. Como aquí, no se pretende, el análisis de los grupos estructurales de las mezclas moleculares que forman los aceites, por los "métodos gráficos estadísticos" (41), que relacionan mediante funciones matemáticas de tipo aditivo los valores de varias constantes físicas, tales como la densidad, la viscosidad, el índice de refracción, la tensión superficial, el peso molecular y la constante de Verdet; sino más bien, la influencia de estas constantes atendiendo a su carácter físico absoluto, incluyendo el diámetro molecular



Placa VIII-b

PROBETA BABBITT.—(Pb=80,51% ; Fe=0,001% ; Cu=0,27% ;
Sn=9,72% ; As%Trazas ; Sb=9,50%).

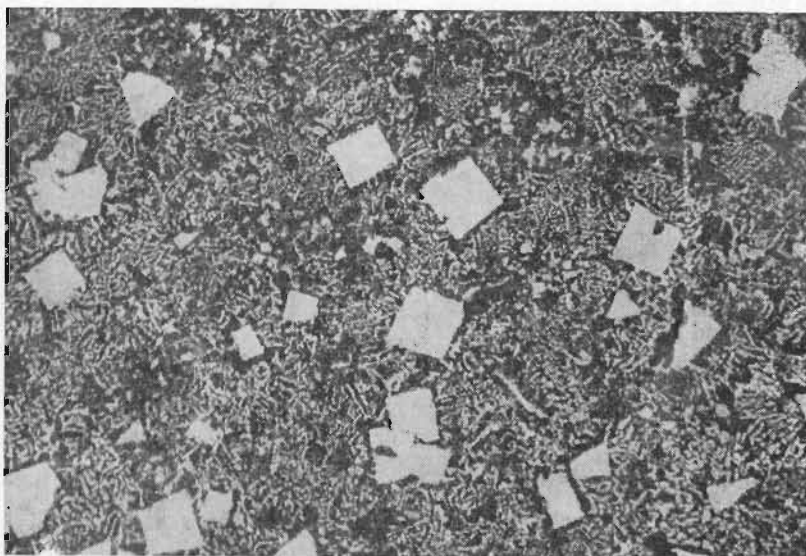
ATAQUE.—Nitrato de plata (10 gr. NO_3Ag ; 90 ml. de agua).

AUMENTOS.— $\times 150$.

ESTRUCTURA.—Eutético pseudo-binario M.

medio, en la clasificación de los aceites según las normas S. A. E., disponiendo así de un criterio experimental sobre el comportamiento lubricador de aceites de procedencias diversas, y por tanto, con grupos estructurales químicamente diferentes. Se han determinado para cada muestra de aceite las constantes físicas siguientes:

- a) La densidad.
- b) La viscosidad.
- c) El peso molecular medio.
- d) La tensión superficial.
- e) El calor molar de vaporización.
- f) El diámetro molecular medio.



Placa IX

PROBETA TREFF.—(Pb=70,79% ; Fe=0,05% ; Cu=1,05% ;
Sn=17,04% ; As=0,03% ; Sb=11,02%)

ATAQUE.—Nital al 2%.

AUMENTOS.— $\times 75$.

ESTRUCTURA.—Compuesto β (cubos claros) + eutéctico S.

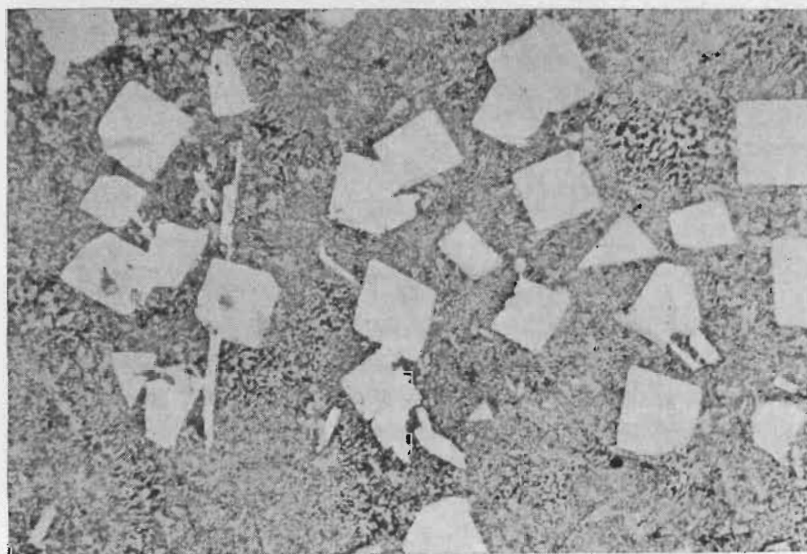
2.^a) Mientras que los resultados de la viscosidad dinámica absoluta obtenidos a 25° C. y expresados en centipoise, van de acuerdo con la clasificación internacional S. A. E.; en cambio, las otras constantes físicas no sirven para clasificar según estas normas a los aceites lubricantes procedentes de crudos diversos. Observándose, sin embargo, una correlación entre la tensión superficial, el calor molar de vaporización y el diámetro molecular medio, que se acentúa al crecer la temperatura.

Valores de la viscosidad de los aceites a 25° C., expresados en centipoise.

Aceite de parafina — 70,2. SAE 10 — 94,7. SAE 20 — 122,3.
SAE 30 — 297,4. SAE 40 — 361,6. SAE 50 — 501,8. SAE 60 —
632,3. SAE 70 — 1.244,0.

Valores de varias constantes físicas de los aceites a 100° C.

Tipo de aceite	Peso molar M	Densidad ρ	Tensión. supf. σ	Calor mol Vap L	Diámetro molar d
Aceite parafina	362 g/mol	0,8216 g/cc	27,5 dina/cm	5.637 cal/mol	6,7 Å
SAE 10	310 »	0,8575 »	27,5 »	5.750 »	6,7 »
SAE 20	575 »	0,8314 »	26,5 »	5.363 »	6,1 »
SAE 30	422 »	0,8444 »	27,0 »	10.402 »	8,7 »
SAE 40	463 »	0,8419 »	27,5 »	10.514 »	9,2 »
SAE 50	409 »	0,8736 »	28,6 »	11.516 »	9,9 »
SAE 60	510 »	0,8447 »	28,0 »	7.637 »	7,6 »
SAE 70	616 »	0,8518 »	29,6 »	10.141 »	10,1 »



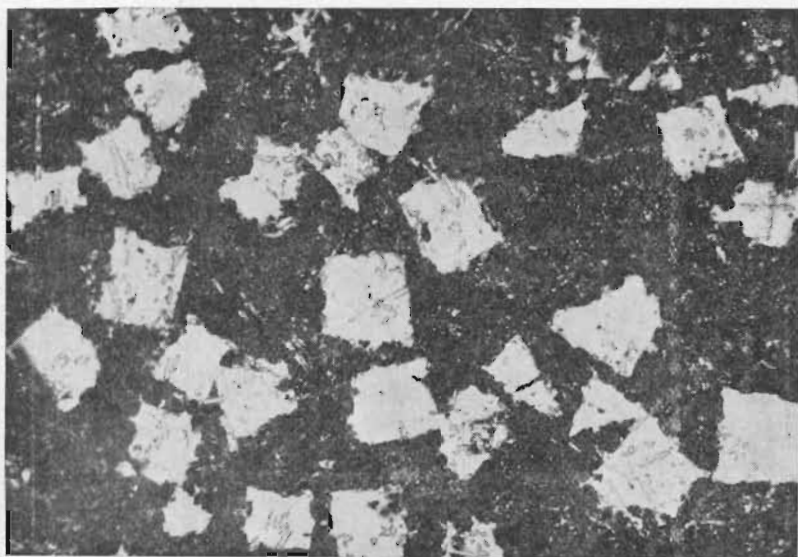
Placa X

PROBETA AUTO.—(Pb=30,69%; Fe=0,02%; Cu=4,66%;
Sn=54,99%; As=0,03%; Sb=9,58%).

ATAQUE.—Nital al 2%.

AUMENTOS.— $\times 75$.

ESTRUCTURA.—Compuesto β (cubos) + eutéctico S + compuesto γ (agujas) + compuesto ξ (gran aguja).



Placa XI

PROBETA CORR.—(Pb=46.99% ; Fe=0.04% ; Cu=2.15% ; Sn=41.49% ;
As=0.01% ; Sb=9.31%).

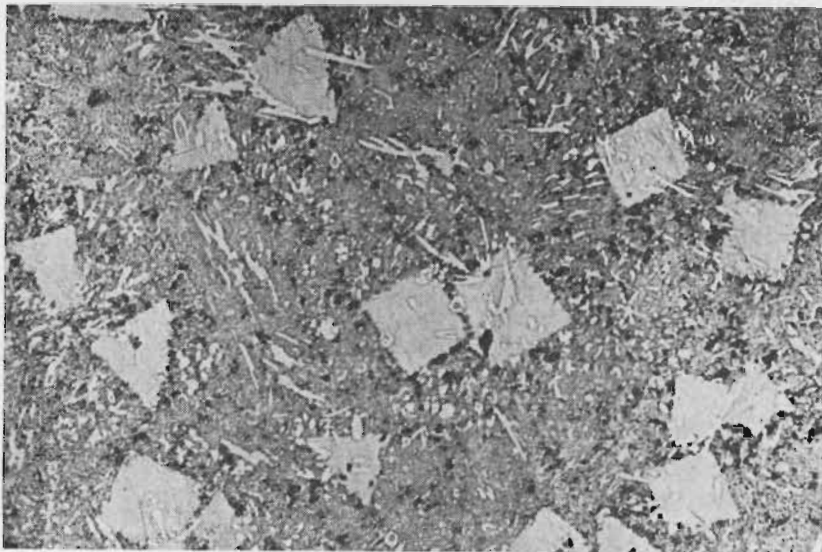
ATAQUE.—Mezcla de ácidos en glicerina (10 ml. ácido nítrico; 10 ml.
ácido acético; 80 ml. glicerina).

AUMENTOS.— $\times 75$.

ESTRUCTURA.—Compuesto β (cubos) + compuesto γ + eutéctico S.

3.^a) Por vez primera, se aplica la fórmula de Espurz al cálculo de los diámetros moleculares medios de los aceites, habiéndose obtenido para todos ellos, resultados donde la variación del diámetro molecular con la temperatura está de acuerdo con lo previsto por la teoría cinética.

4.^a) Distinguiendo, la lubricación fluída de la lubricación límite, la primera debida a la viscosidad del aceite y la segunda dependiendo de la naturaleza de la superficie metálica en relación con la composición química del aceite lubricante (42), hemos utilizado el medidor de lubricación de Richard von Dallwitz Wegner para medir los ángulos de contacto que presentan los aceites respecto de los metales antifricción.



Placa XII

PROBETA AUTO A-D.—(Pb=0,27%; Fe=0,05%; Cu=5,10%;
Sn=89,53%; As=0,02%; Sb=4,99%).

ATAQUE.—Cloruro férrico (10 g. de Cl_3Fe ; 2 ml. Cl_{11} concentrado;
95 ml. agua).

AUMENTOS.— $\times 150$.

ESTRUCTURA.—Fase γ + compuesto β (cubos) + compuesto γ (agu-
jas o estrellas).

5.^a) Con los valores de los ángulos de contacto y con las tensiones superficiales halladas con el aparato de Lecomte de Noüy, se calcularon las energías de adhesión (43) entre los aceites y la superficie de las probetas de cojinetes.

6.^a) Se hace un estudio experimental de las microestructuras metalográficas sobre las mismas probetas de los metales anti-fricción, que sirvieron anteriormente para llevar a cabo las medidas de la lubricación con los diferentes aceites. Donde valiéndose de las fotomicrografías se analizan y representan las variedades típicas de estas aleaciones (44), tanto las de matriz dura

como las de matriz blanda, con estructuras dendrítica y no-dendrítica.

7.^a) Teniendo en cuenta que en los últimos trabajos sobre la capa límite de lubricación (45), se ha comprobado que aún las superficies metálicas mas cuidadosamente preparadas, presentan una finísima contaminación gaseosa u oxidación en forma de lámina delgadísima, la cual es reemplazada por el lubricante; en cuyo fenómeno, las cadenas de hidrocarburos se agrupan en estructuras de tipo cristalino, surgiendo sobre la superficie metálica orientaciones con las cadenas normales o ligeramente inclinadas, pudiendo llegar a formarse una capa orientada hasta de un espesor de 50 moléculas (46) que por calentamiento, se desorganiza esta estructura cristalina, naciendo la verdadera capa límite de moléculas, siendo el proceso reversible como el de la fusión (47). Pero sin embargo, permaneciendo las moléculas de la monolamina inmediata a la superficie metálica, firmemente unidas a ella por adsorción (48), manteniéndose sus orientaciones, que se debilitan progresivamente hasta desaparecer en la cuarta lámina monomolecular, por encima de la cual, la capa límite se comporta como fluída. Habiéndose determinado para esta capa espesores hasta del orden de 200 A (49).

Nuestras medidas de los diámetros moleculares medios de los aceites lubricantes, están de acuerdo con estos resultados, como confirman los siguientes valores:

Temperatura de 25° C.

Valor mínimo
SAE 20 — 7,1 A

Valor máximo
SAE 70 — 11,7 A

Temperatura de 100° C.

SAE 20 — 6,1 A

SAE 70 — 10, 2 A

8.^a) Las energías de adhesión entre los aceites lubricantes y los metales antifricción, varían desde un valor mínimo de 51,56 dina/cm. para el aceite de parafina sobre ZAMAK 2, hasta un valor máximo de 62,07 dina/cm. para el S. A. E., 60 sobre bronce fosforoso, lo que indica, un comportamiento sin grandes discrepancias, de las capas límites de lubricación estudiadas por nosotros.

RÉSUMÉ

Dans ce travail, qui contient la thèse doctorale en Sciences Chimiques de l'auteur, on a déterminé d'une manière systématique une série de constantes physiques qui correspondent à un groupe d'échantillons d'huile lubrifiantes pour moteurs à combustion interne, classifiées d'accord avec la dénomination internationale S A E, auquel on a ajouté comme huile témoin, la neutre de paraffine. On a vérifié que quand elles procèdent de crus différents, seule la viscosité sert pour les classifier selon cette règle. D'autre part, on a étudié les microstructures de divers alliages antifricción, ainsi comme les énergies d'adhésion en relation avec les diamètres moléculaires des huiles dans la couche limite.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Amontons.—Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 206 (1699).
- (2) Coulomb.—Mémoires de Mathématique et de Phisique de l'Académie Royal des Sciences, 161 (1785).
- (3) Bowden, Moore, Tabor.—J. Appl. Phys, 14,80 (1943).
- (4) O. Reynolds.—Papers on Mechanical and Physical Subjects 2. Cambridge.—University Press (1901).
- (5) Hardy.—Collected Works (1936). Cambridge Univ. Press.
- (6) Marcelin.—R. G. Mecanique, 34 (1950).
- (7) Bowden y Moore.—Trans. Faraday Soc 47,900 (1951).
- (8) Sanders y Tabor.—ibid A, 204, 525 (1950).
- (9) Dupré.—Ann. Chim., 2, 185 (1864).
- (10) Harkins.—Jour. Chem. Phys. 10, 342 (1942).
- (11) Hardy y Nottage.—Proc. Roy Soc A. 138, 259 (1932).
- (12) Hersey.—Teory of Lubrication (1936).
- (13) Bowden y Tabor.—J. Appl. Phys. 14, 141 (1943).
- (14) H. Bassett.—Bearing Metals and Alloys (1937).
- (15) Sachanen.—“The Chemical Constituents of Petroleum” (1945).
- (16) Rossini.—Anal. Chemi. 20, 110 (1948).
- (17) Pritzker.—Natl. Petroleum News. 37, 40, 793 (1945).
- (18) “S A E Handbook” Society of Automotive Engineers (1948).
- (19) Georgi.—“Motor oils and engine lubrication” (1950).
- (20) Gambill.—Chem. Eng. 64, 12, 261 (1957).
- (21) Neidle.—J. Amer. Chem. Soc. 39, 2387 (1917).
- (22) F. Höppler.—World Petroleum Congress. p. 195 (1933).

- (23) Turner.—Chem. Soc. 97, 1184 (1910).
- (24) Beckmann.—Z. Phys. Chem. 15, 662 (1894).
- (25) Dallwitz-Wegner.—Petroleum 24, 25 (1921).
- (26) Dallwitz-Wegner.—Ztschft. f. techn. Phys. n.º 1 (1922).
- (27) Lecomte du Noüy.—J. de Phys. 6, 145 (1923).
- (28) Lecomte du Noüy.—Phil. Mag. 48, 264, 666 (1924).
- (29) S. Mokroushin.—Phil. Mag. 48, 765 (1924).
- (30) A. Espurz.—An. Fis. Quim. 38, 303 (1942).
- (31) Eötvös.—Wied. Ann. 27, 448 (1886).
- (32) Ramsay y Shields.—Phys. Chem. 12, 431 (1893).
- (33) Madelung.—Phys. Zeit. 14, 729 (1913).
- (34) Born y Courant.—Phys. Zeit. 14, 731 (1913).
- (35) Regnault.—Ann. Chim. 15, 129 (1845).
- (36) Tammann.—Ann. Phys. 33, 322 (1888).
- (37) Pfauder.—Ann. Phys. 63, 36 (1897).
- (38) Jones y Bowden.—Phil. Mag. 37, 480 (1946).
- (39) R. N. Greaves y H. Wrighton.—Practical Microscopical Metallography (1925).
- (40) Weaver, Iwasé y Aoki.—Metals Handbook. pg. 1.267 (1948).
- (41) Kvan Nes y H. A. van Westen.—Aspects of the Constitution of Mineral Oils (1951).
- (42) Hughes y Whittingham.—Trans. Faraday. Soc. 38, 9 (1942).
- (43) R. S. Burdon.—Surface Tension and the Spreading of Liquids (1949).
- (44) Bowden y Tabor.—The Friction and Lubrication of Solids. pág. 128 (1954).
- (45) G. I. Finch.—Physics of Lubrication. Supplement 1, 34. Appl. Phys (1951).
- (46) G. I. Finch y F. D. Zahoorbux.—General Discussion on Lubrication. 2, 295 Inst. Mch. Engrs. (1937).
- (47) E. Tingle.—Trans. Faraday Soc. 46, 93 (1950).
- (48) Brummage.—Proc. Roy. Soc. A, 188, 414 (1947).
- (49) H. I. Waterman.—Correlation between Physical Constants and Chemical Structure (1958).