



UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE QUIMICA
INCORPORADA A LA UNAM.

DISEÑO DE UNA PRACTICA SOBRE VISCOSIDAD DE LIQUIDOS PARA LA UNIVERSIDAD LA SALLE

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
SANTIAGO COLLADO OLIVEROS

DIRECTOR DE TESIS: M.C. ANTONIO VALIENTE B.

MEXICO, D. F.

1990

FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E .

	Página
Objetivo	1
Capítulo I Generalidades sobre Viscosidad .	
1.1 Definición de Viscosidad	2
1.2 Influencia de las propiedades de los fluidos en su comportamiento	15
1.3 Estimación de la viscosidad de un gas de baja presión	25
1.4 Estimación de la viscosidad de mezcla de gases a bajas presiones	34
1.5 Estimación de la viscosidad de un líquido a baja temperatura	43
1.6 Estimación de la viscosidad de un líquido a alta temperatura	53
1.7 Estimación de la viscosidad de mezcla de líquidos	55
Capítulo II Tipos de viscosímetros y su funcionamiento.	
2.1 Generalidades	62
2.2 Viscosímetros de Tubo capilar	64
2.3 Viscosímetros absoluto y normalizado.	66
2.3.1 Viscosímetro Saybolt	68
2.4 Viscosímetros Relativos	69

2.5	Viscosímetros de caída por gravedad .	69
2.5.1	Viscosímetro de Ostwald	69
2.6	Viscosímetros capilares modernos para mediciones relativas	80
2.7	Viscosímetros de Presión	84
2.8	Viscosímetros Rotacionales	85
2.8.1	Viscosímetro de cilindros coaxiales .	85
2.8.2	Viscosímetro de Brookfield	88
2.8.3	Electroviscosímetro	89
2.8.4	Viscosímetro Oscilatorio	89
2.9	Viscosímetros de caída de un cuerpo .	90
2.9.1	Viscosímetro de Hoppler	92
2.10	Viscosímetros de Gases	94
2.11	Viscosímetros de acercamiento o de apartamiento de superficies	94
2.12	Instrumentos ultrasónico y de disco vibratorio	95
2.13	Instrumentos de gran velocidad de corte	96
2.14	Instrumentos para mediciones de propiedades elásticas y del comportamiento no Newtoniano	97

Capítulo III Experimentación .

3.1	Introducción	98
3.2	Procedimiento	102
3.3	Resultados Obtenidos	104

Capítulo IV Análisis de Resultados .

4.1	Análisis de resultados	112
4.2	Tabla de comparación entre las viscosidades obtenidas en la experimentación y las reales	113
4.3	Cálculo de las constantes de Andrade.	115
4.4	Cálculo de las viscosidades mediante correlaciones	117
4.5	Tabla de comparación entre las viscosidades obtenidas mediante las correlaciones, las experimentales y las reales	125
4.6	Tabla de Porcentajes de error obtenidos en la medición de viscosidades mediante las correlaciones	127

Capítulo V Práctica Propuesta .

5.1	Generalidades	131
5.2	Procedimiento	137
	Conclusiones	145
	Bibliografía	147

O B J E T I V O .

La presente Tesis tiene como objetivo Implantar una Práctica sobre la medición de Viscosidades de Líquidos, para el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad La Salle, realizando diferentes experimentos con el propósito de establecer que sustancias son con las que se obtienen mejores resultados, las condiciones de operación más adecuadas y el óptimo funcionamiento de los aparatos para el desarrollo de la Práctica.

CAPITULO I

Generalidades sobre Viscosidad.

En general, la materia puede clasificarse por las formas físicas en que se presenta. Estas formas conocidas como fases son la sólida, la líquida y la de gas o vapor. Los fluidos comprenden las fases líquida y gaseosa (o de vapor) de la materia. Sabemos que los líquidos y los gases tienen aspectos completamente distintos, por lo que debemos buscar una característica común que nos permita clasificarlos como fluidos.

Al discutir la dinámica de fluidos, nos interesa el estudio de los fluidos en movimiento y la forma en que este comportamiento se relaciona con los momentos y las fuerzas aplicadas.

Tanto los líquidos como los gases y vapores tienen en común una forma distinta de reaccionar cuando están sometidos a esfuerzos tangenciales, lo cual explica su fluidez y nos permite desarrollar los principios de la dinámica de los fluidos. Este rasgo común y distintivo se establece como sigue:

Un fluido se deformará continuamente bajo esfuerzos (tangenciales) cortantes, no importa cuán pequeños sean estos. La magnitud del esfuerzo depende de la rapidez de deformación angular. Un sólido, por otra parte, se deformará proporcionalmente a la fuerza aplicada, después de lo cual se llegará al equilibrio estático; y en este caso la magnitud del esfuerzo tangencial depende de la magnitud de la deformación angular.

No todos los fluidos muestran exactamente la misma relación entre el esfuerzo y la rapidez de deformación. Un fluido se llama Newtoniano (Denominado según Newton quien estudió el movimiento de los fluidos, con suposiciones que corresponden a la viscosidad absoluta constante), si el esfuerzo tangencial es directamente proporcional a la rapidez de deformación angular, partiendo de esfuerzo cero y deformación cero, cuya constante de proporcionalidad es definida como μ , la viscosidad absoluta o dinámica.

Así los fluidos Newtonianos tienen la propiedad de poseer una viscosidad dinámica independiente del movimiento al que está sometido el fluido. Los fluidos más comunes como el agua y el aire son Newtonianos.

Hay una analogía entre los fluidos Newtonianos que tienen una viscosidad constante la cual relaciona al esfuerzo con la rapidez de deformación y los sólidos que obedecen a la ley de Hooke, con un módulo de elasticidad constante, el cual relaciona al esfuerzo con la magnitud de la deformación .

El flujo Newtoniano es la deformación irreversible de los líquidos que ocurre de tal manera que la velocidad de deformación en el corte es proporcional al esfuerzo cortante.

LEY DE NEWTON.- La viscosidad es la fricción o rozamiento interno de las sustancias que fluyen. Se mide fácilmente en las condiciones de flujo laminar. El flujo laminar es el que puede considerarse formado por delgadas láminas que fluyen unas sobre otras a velocidades diferentes. Cuando el flujo no sigue este esquema se llama turbulento. El flujo laminar se representa imaginando el comportamiento de un líquido que se separe en dos láminas paralelas de las cuales una es estacionaria y la otra se mueve a velocidad constante pasándola en su propio plano.

Con el fin de mantener constante la velocidad, ha de aplicarse a la lámina que se mueve una fuerza que según Newton es proporcional al área de las láminas y al gradiente de velocidad del fluido que está entre ellas :

$$f \propto Av/h = \eta Av/h$$

$$\eta = fh/av$$

en donde f = fuerza , η = coeficiente de viscosidad, h = grosor de película , A = área de la lámina y v = velocidad de la lámina.

La constante de proporcionalidad es característica de un fluido "normal" a presión y temperaturas dadas y se llama coeficiente de viscosidad, o para mayor brevedad, la viscosidad del fluido.

La viscosidad se puede medir por observación de una cualquiera de las variables de la ecuación anterior, mientras las otras se mantienen constantes a un nivel conocido.

La definición de viscosidad absoluta según la ley de Newton supone la medición de una fuerza tangencial que actúa sobre un plano en movimiento. Esto se hace en la práctica en los viscosímetros rotacional y oscilatorio. Los primeros viscosímetros del tipo Couette, se basan en la ley de Newton; el tratamiento matemático es mucho más sencillo con este sistema que con el oscilatorio. Sin embargo, es difícil construir un instrumento con rotación uniforme y tan libre de vibración y de excentricidad como se necesita para mediciones precisas. Es más fácil construir un sistema hecho para oscilar alrededor de una posición media y medir su respuesta a la resistencia viscosa que se le opone.

Hemos visto que si un fluido no perfecto se mueve deformándose, se originan presiones tangenciales en todos los puntos situados en la zona de deformación. Estas presiones tangenciales se manifiestan como esfuerzo constante, y la resistencia que el fluido ofrece a dicho esfuerzo se llama "viscosidad". A veces se emplea el término de "viscosidad dinámica" recordando que las presiones tangenciales solo se presentan en los fluidos en movimiento con deformación. El término "fluido viscoso" es sinónimo de "fluido no perfecto".

Contrariamente a lo que acontece en los sólidos, en los fluidos nunca se alcanza un estado de equilibrio entre las presiones tangenciales y la resistencia, con que termina la deformación. pues en los fluidos existe la viscosidad, que resiste a las presiones tangenciales.

Imaginemos que en alguna parte de una corriente fluida obra cierta causa que detenga localmente al flujo, por ejemplo una pared AB, en cuyo contacto el fluido queda prácticamente inmóvil. A medida que nos alejamos de la pared vemos las partículas fluidas adquirir velocidades siempre mayores, hasta alcanzar la velocidad de régimen v_0 . Si para un desplazamiento elemental normal a la corriente Dy resulta un incremento Dv de la velocidad, y la presión tangencial local es c , se comprueba que, para una temperatura y una presión determinadas, este esfuerzo varía aproximadamente en proporción directa con la velocidad de deformación Dv/Dy . Se llama coeficiente de viscosidad dinámica y se indica con μ el coeficiente de proporcionalidad :

$$\mu = \frac{c}{dv/dy}$$

En el sistema M.K.S. (metro, Kg-fuerza, segundo) el coeficiente de viscosidad dinámica μ se mide en Kg.s/m^2 . En el sistema C.G.S. (centímetro, gramo-masa, segundo), μ se mide en g/cm.s , unidad a que se le suele dar el nombre de Poise :

$$1 \text{ Poise} = 1 \text{ g/cm.s.}$$

Los fluidos que manifiestan una proporcionalidad variable entre esfuerzo y rapidez de deformación se conocen como NO Newtonianos. En tales casos la proporcionalidad, puede depender del intervalo de tiempo durante el cual el fluido está sujeto al esfuerzo; así como de la magnitud del mismo. Un gran número de fluidos de uso poco común, pero que son sumamente importantes, son No Newtonianos. Algunas sustancias, especialmente algunos de los plásticos, tienen un esfuerzo de fluencia, por debajo del cual se comportan como un sólido, pero más allá de este se comportan como un fluido.

LEY DE POISEUILLE.- También ocurre flujo laminar cuando fluyen por tubos los fluidos a velocidad moderada. La capa fina del fluido en contacto con la pared del tubo es probablemente estacionaria; la capa siguiente fluye lentamente y la capa adyacente con mayor rapidez. El fluido corre entonces como si consistiera en muchos cilindros concéntricos, cada uno de los cuales se mueve con velocidad constante, que aumenta de la pared al centro del tubo.

Poiseuille estudió el movimiento en capilares y halló que el volumen de líquido que pasa por un capilar en la unidad de tiempo era proporcional a la presión, a la cuarta potencia del radio del tubo e inversamente proporcional a la longitud del tubo.

$$\frac{v}{t} = K \frac{p r^4}{l}$$

en donde p es la diferencia de presión entre los extremos del tubo; v es el volumen total de líquido que fluye; l la longitud del tubo; t es el tiempo de flujo y K es la constante de proporcionalidad. Basándose en esta relación se desarrolló la ley conocida como la ley de Poiseuille :

$$\eta = \frac{4 r^4 p t}{8 v l}$$

En esta derivación se ha supuesto que v/l es pequeño y que la velocidad con la cual el líquido deja el tubo es despreciable. En realidad, esto no es cierto y han de efectuarse las correcciones pertinentes.

En la medición del flujo por capilares, la densidad del líquido entra en la relación de modo más inmediato, pues el término de la presión en la ecuación anterior está representado frecuentemente por la atracción de gravedad de la columna líquida que fluye. El tiempo de paso de líquido por los viscosímetros del tipo de Ostwald es aproximadamente proporcional a la razón de la viscosidad de un líquido a su densidad, en las mismas condiciones, y esta razón se conoce como viscosidad cinemática :

$$\nu = \frac{\eta}{d}$$

En donde ν es la viscosidad cinemática a la temperatura t ;
 η es la viscosidad absoluta a la temperatura t ; y ρ es la
densidad del líquido a la temperatura t .

La viscosidad cinemática se mide en cm^2/s o mejor el
 cm^2/s . esta última unidad se conoce bajo el nombre de Stokes:

$$1 \text{ Stokes} = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$$

La viscosidad cinemática es un concepto de importancia
básica en la dinámica de fluidos. Como esta magnitud se observa
de modo inmediato y bastante preciso con equipo relativamente
sencillo, el concepto y la medición de la viscosidad cinemática
han adquirido gran importancia en actividades industriales, al
igual que en las consideraciones teóricas mencionadas.

En varios viscosímetros o viscosímetros comerciales comunes
se mide la viscosidad cinemática en función del tiempo θ (seg),
que tarda en pasar un volumen fijo de líquido por un tubo capilar
normalizado. La expresión segundos Saybolt, por ejemplo, se
refiere al tiempo que tarda en pasar el líquido por un
viscosímetro Saybolt. En consecuencia se determina empíricamente
la relación entre el tiempo de paso θ y la viscosidad cinemática.
Esos instrumentos son poco satisfactorios para los líquidos poco
viscosos por que el paso a través del tubo es turbulento.

LEY DE STOKES .- Si un cuerpo se mueve en el seno de un fluido, el fluido contiguo al cuerpo puede considerarse de velocidad cero con respecto al sólido; las capas adyacentes se ponen en movimiento por el arrastre viscoso en los sistemas que se han discutido antes. Por medio de los principios de la hidrodinámica es posible calcular las fuerzas de rozamiento debidas al arrastre viscoso sobre cuerpos de forma sencilla. Stokes derivó la relación correspondiente al movimiento de una esfera:

$$f = 6\pi r v \eta$$

en donde f es la fuerza que obliga a la esfera a moverse a través del líquido a velocidad constante, v y, r es el radio de la esfera. Si se deja caer la esfera libremente en un fluido, se acelerará hasta que la fuerza de viscosidad equilibre exactamente la fuerza de la gravedad, y

$$6\pi r v \eta = \frac{4}{3} \pi r^3 (d_s - d_f) g$$

en donde d_s es la densidad de la esfera y d_f es la densidad del fluido. De esta ecuación se obtiene la forma usual de la ecuación de Stokes:

$$\eta = \frac{2r^2 (d_s - d_f) g}{9v}$$

Por ello, si se dan el radio de la esfera y las densidades que intervienen, puede usarse esta relación para determinar la viscosidad de un líquido por observación de la velocidad de caída del cuerpo en el fluido. Se aplica a muchos sistemas, como a las gotas de líquido que caen en un medio gaseoso, a los sólidos en líquidos, etc. El primer sistema figuró en la determinación del número de Avogadro. El segundo se usa comúnmente en la determinación de viscosidades de líquidos en el viscosímetro de bola descendente de Hoppler y otros aparatos.

Un fluido ideal o perfecto es un líquido o un gas hipotético que no ofrece ninguna resistencia a la cortadura y, que por consiguiente tiene una consistencia cero. No hay que confundir el fluido perfecto imaginario con el gas perfecto, que es un fluido para el cual $PV = RT$. P es la presión estática absoluta, V es el volumen específico, r es la constante de gas y T es la temperatura absoluta.

La viscosidad relativa de un fluido es la relación de su viscosidad a la del agua a 20°C. La viscosidad del agua a 20°C es aproximadamente 1 centipoise; por consiguiente para los fines de la práctica, la viscosidad relativa de un fluido es idéntica a la viscosidad en centipoises.

La viscosidad específica es la relación de la viscosidad de un fluido a la de un fluido patrón (por lo general el agua, o el disolvente en el caso de soluciones), tomándose ambas viscosidades a la misma temperatura.

La fluidez es la recíproca de la viscosidad. En el sistema C.G.S. se denomina a veces la unidad de fluidez el rhe = 1 poise.⁻¹

Se puede hacer una subdivisión de los fluidos en dos clases principales, compresibles e incompresibles, sobre la base de su reacción a esfuerzos de presión (normales). Todos los gases y vapores son altamente compresibles. Los líquidos por el contrario, son ligeramente compresibles. La compresibilidad introduce consideraciones termodinámicas a los problemas de flujo de fluidos. Si se puede suponer la incompresibilidad, es mucho más fácil describir el estado del fluido y su comportamiento cuando está en movimiento.

Con algunas excepciones importantes los líquidos para todo propósito práctico, se tratan generalmente como incompresibles. Los gases solo se consideran incompresibles si el cambio de la presión es muy pequeño a través del sistema de flujo.

Todos los fluidos están compuestos por moléculas discretamente espaciadas y en movimiento continuo; en las definiciones usadas anteriormente para describir los fluidos,

esta estructura molecular discreta fué ignorada y el fluido se consideró como un medio continuo. Esto significa que todas las dimensiones en el espacio del fluido se consideran grandes, comparadas con el espacio molecular, suposición que haremos, adn cuando consideremos como nula a la distancia del fluido a la pared de frontera.

Esto significa también que todas las propiedades del fluido tales como la densidad y la viscosidad serán continuas, de punto a punto, a través de la región en que se encuentre el fluido.

Finalmente, un comportamiento importante de los fluidos viscosos es la condición de no-deslizamiento en las fronteras rígidas. Experimentalmente observamos que los fluidos reales tienden a adherirse a las fronteras, lo cual da por resultado una velocidad cero con respecto a ellas. De este modo, analizando movimientos de fluidos con viscosidad, vemos que esta condición física debe ser siempre satisfecha.

Una fórmula aproximada que permite calcular el coeficiente de viscosidad dinámica del agua a diferentes temperaturas y bajo presión atmosférica, es la siguiente:

$$\mu \text{ (agua)} = \frac{0.0178}{1 + 0.0337 t + 0.000221 t^2} \text{ (Poises)}$$

Donde t representa la temperatura en grados Centígrados.

Por lo tanto la viscosidad del agua va bajando con el aumento de la temperatura: del valor de 1.7921 centipoises a 0°C baja a 1.3077 cP a 10°C, 1.0050 cP a 20°C y 0.8007 cP a 30°C.

Para el aire se tiene esta otra fórmula aproximada:

$$\mu \text{ (aire)} = 0.00017155 (1 + 0.00275 t^2 - 0.00000034 t) \text{ (Poises)}$$

de la que resulta que la viscosidad del aire crece con el aumento de la temperatura. A 0°C tenemos para μ el valor de 0.0172 cP., a 20°C el de 0.0181 cP., a 40°C el de 0.0190 cP..

Si los coeficientes de viscosidad dinámica del agua son mayores que los del aire, lo contrario sucede con la viscosidad cinemática. En efecto, mientras la μ del aire es del orden de 100 veces la del agua, la densidad es del orden de 1000 veces. por lo tanto la ν del agua será del orden del décimo de la del aire.

INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS EN SU COMPORTAMIENTO .-

PRESION .- Aunque el concepto de presión se comprende generalmente, es conveniente aclarar algunos puntos relacionados con el uso del término. Al analizar las fuerzas que actúan sobre un fluido, podría hacerse en relación con la fuerza por unidad de área o el esfuerzo que actúa sobre una porción de superficie del elemento fluido. Conviene recordar que el esfuerzo es una cantidad vectorial que tiene tanto magnitud como dirección.

Si elegimos un punto arbitrario en un fluido, podemos trazar a través de él, un elemento de área orientado en una dirección particular. El esfuerzo ejercido sobre este elemento de área puede descomponerse en tres componentes, dos de los cuales están en el plano del área y la otra es normal al área.

En resumen podemos descomponer el vector esfuerzo del elemento de área en tres componentes perpendiculares entre sí, procedimiento que puede aplicarse a cualquier vector. Las dos componentes situadas en el plano del área se llaman esfuerzos tangenciales. El esfuerzo tangencial que actúa sobre la cara de un fluido situado entre dos paredes planas, la componente de esfuerzo normal al área se denomina esfuerzo normal.

Tomemos un punto arbitrario de un fluido en reposo; haremos pasar un elemento de área por dicho punto y se establecerá un esfuerzo normal en un lado de dicha área. Luego hacemos girar el elemento de área sobre un eje que pasa a través del punto y reposa sobre el área. El esfuerzo normal debe determinarse en cada nueva orientación del área. Encontramos que, en tanto el fluido está en reposo, la magnitud de la componente vectorial del esfuerzo normal no varía. Se puede demostrar que esto es consecuencia del equilibrio de fuerzas ejercidas sobre un elemento de volumen que rodea al punto. Esta magnitud invariable del esfuerzo normal se llama, simplemente, presión en un punto del fluido y se designa por P . El esfuerzo se considera un esfuerzo de compresión.

Si escogemos ahora un punto de un fluido en movimiento, encontramos ahora que, en general, el elemento de área puede tener un valor de esfuerzo normal, en posición horizontal, y otro distinto cuando se coloca en posición vertical. En consecuencia no podemos referirnos a la presión en un punto con el mismo sentido que en el caso estático.

Se acostumbra dividir un esfuerzo normal dado en dos partes o componentes. Una de ellas es la componente de presión, esto es, la que no cambia con la orientación del elemento fluido. La otra se conoce casi siempre como "esfuerzo normal viscoso" y varía con la orientación del elemento de área, siendo una función de la viscosidad del fluido.

Es importante tener presente que siempre que se hace cualquier referencia al término presión, se está considerando la componente invariable del esfuerzo normal. Si un fluido permanece en reposo, en relación al medio que lo rodea, el efecto de la viscosidad no se manifiesta. Tanto el esfuerzo normal viscoso como el tangencial dependen del movimiento del fluido.

DENSIDAD Y VOLUMEN ESPECÍFICO .- La densidad ρ de un fluido, en un punto, se ha definido como :

$$\text{densidad} = \rho = \lim_{dV \rightarrow 0} \frac{dm}{dV}$$

donde dV es el volumen mínimo alrededor del punto para el cual es aplicable el concepto de continuo.

La densidad de un gas ideal está dada por la conocida ecuación de estado de un gas ideal :

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad \text{o} \quad \frac{1}{\rho} = v = \frac{RT}{P}$$

El volumen específico, $v = 1/\rho$, es el recíproco de la densidad.

La densidad del líquido saturado de muchas sustancias se encuentra en sus tablas convencionales de la propiedades termodinámicas correspondientes. En la mayoría de las sustancias la densidad del líquido saturado varía considerablemente con la temperatura. La variación de la densidad del líquido, cuando se aumenta la presión a temperatura constante, es casi siempre pequeña, aunque esta variación es algo mayor en la región del punto crítico.

TEMPERATURA .-

La viscosidad absoluta de la mayoría de los fluidos muestra una gran variación con la temperatura; pero es relativamente insensible a la presión, a menos que ésta alcance valores elevados. Para los gases que están a una temperatura doble de la crítica, las variaciones de la viscosidad con la presión son insignificantes, hasta que alcanzan los valores de la presión muy próximos a la presión crítica. En el caso del aire a la temperatura ambiente, las presiones a las que son notables las variaciones de la viscosidad, son de aproximadamente 350 kg/cm².

En la mayoría de los casos de interés, puede deshecharse el efecto de la presión sobre la viscosidad de los líquidos. Por ejemplo, para un cálculo aproximado del efecto de la presión en los aceites derivados del petróleo, se supone que un incremento de 15 kg/cm² en la presión, produce un cambio en la viscosidad equivalente a la reducción de 1°F (-17.2°C) en la temperatura.

Los cambios de temperatura originan variaciones opuestas en la viscosidad de los líquidos y los gases. Así, una disminución de temperatura hace decrecer la viscosidad de un gas, mientras que en los líquidos la aumenta.

Este aumento de viscosidad en los líquidos, al reducirse la temperatura, queda claramente comprobado, cuando pretendemos poner en marcha un automóvil en los fríos días del invierno. Las diferencias en la variación de viscosidad con la temperatura, en líquidos y gases, se comprenden cuantitativamente, si analizamos los mecanismos básicos que dan origen a la viscosidad. Se ha determinado que el mecanismo básico de la viscosidad en los gases, a bajas presiones, es predominantemente un intercambio molecular de cantidades en movimiento. Puesto que las moléculas de los gases están en continuo movimiento, podemos suponer que cuando una corriente de gas fluye en una dirección dada, tendrá lugar algún movimiento molecular en la dirección normal (del flujo).

Las moléculas con menor velocidad emigran hacia las zonas de mayor velocidad de flujo, chocan con otras y las obligan a reducir su velocidad. También se registra una migración general de las moléculas de mayor velocidad a las zonas más lentas, con el consiguiente intercambio de las cantidades de movimiento, los cambios de cantidad de movimiento de las moléculas entre las diversas capas del gas, son la causa del fenómeno que interpretamos como esfuerzo tangencial viscoso. Se ha observado que la viscosidad de los gases aumenta con la temperatura y viceversa. Como analogía aproximada de este fenómeno, podemos imaginarnos a un jugador de fútbol americano, pasando el balón a

otro que corre por el campo. Si se desplaza a gran velocidad y recibe un pase lateral lento, el balón tenderá a frenar al jugador. Por el contrario, si el pase es un tiro raso y rápido a un jugador que corre lentamente, el impacto, al recibirlo, hará que el individuo sea impulsado hacia adelante. Este es un ejemplo sencillo de intercambio de cantidad de movimiento.

Imagine ahora dos líneas de jugadores de fútbol, que corren paralelamente por el campo. Una de ellas lo hace con rapidez y la otra despacio. Si los jugadores de ambas líneas intercambian balones, se observará que los de la línea rápida tienen que detenerse, y los de la lenta aceleran. El efecto neto es semejante al de una fuerza de corte entre ambas líneas. A medida que aumenta la frecuencia con que se lanzan balones, mayor será la influencia neta. Sabemos que cuando aumenta la temperatura de los gases, se incrementa también la actividad molecular correspondiente. Si utilizamos la analogía de los balones lanzados con mayor frecuencia, no es sorprendente que al aumentar la temperatura se observe un incremento en el intercambio de momento y, por lo tanto, en la viscosidad del gas.

Otra fórmula que se ha propuesto para determinar la variación de la viscosidad absoluta del aire a Presión atmosférica, con la temperatura, pero son aproximaciones razonables a bajas temperaturas en intervalos limitados, y los valores que da para temperaturas elevadas soy bastante erróneos.

No es fácil explicar el efecto de la temperatura sobre la viscosidad, en los líquidos. Una de las principales razones es que el mecanismo que da origen a la viscosidad de un líquido no se ha comprendido totalmente. H. Eyring y sus colaboradores, que han escrito ampliamente sobre la viscosidad en líquidos, propusieron un modelo más o menos aplicable. Este modelo se basa en el concepto de la existencia de huecos en un líquido, hacia los que emigran las moléculas líquidas, a condición de que puedan vencer ciertas barreras que las rodean. Un esfuerzo tangencial aplicado a un líquido que fluye, ocasiona una distorsión en las barreras de potencial e incrementa la frecuencia de los reacomodos moleculares. De esta forma se puede calcular la velocidad molecular relativa, en la dirección del flujo, y determinar el gradiente de velocidad normal a la dirección del flujo. Si se conoce el gradiente de velocidad, se puede encontrar una expresión de la viscosidad. El análisis basado en esta consideración conduce a una ecuación de la viscosidad absoluta, en función de la temperatura absoluta, que tiene la forma:

$$\mu = Ae^{b/T}$$

en donde A y b son constantes positivas.

Se han propuesto algunas fórmulas sencillas para predecir la variación de la viscosidad absoluta del agua, en función de la temperatura, una de las más sencilla es :

$$\frac{1}{\mu} = aT + b \quad (a \text{ y } b \text{ son constantes})$$

Esta fórmula se infiere de la observación de que $1/\mu$ es lineal en un intervalo bastante amplio de incrementos de temperatura. Al término $1/\mu$ se le llama Fluidéz. Otra fórmula para calcular la fluidéz, es la siguiente (T en °C) :

$$\frac{1}{\mu} = 1.1812 \cdot 10^{-4} \left(0.00971 [(1.8T - 15.07)^2 + (2620 + (1.8T - 15.07)^{1/2}) - 1] \right) \frac{m}{kg \cdot seg}$$

Aunque las viscosidades se expresan en el sistema de unidades gravitacional inglés, la mayoría de los instrumentos que mide la viscosidad (especialmente de los líquidos) proporcionan dichas lecturas en otros sistemas de unidades, uno de los cuales es el métrico.

La viscosidad cinemática de los aceites se determina, a menudo, con un instrumento llamado viscosímetro universal Saybolt. Las unidades de viscosidad cinemática así determinada son "segundos universales Saybolt" (ts). Estas unidades se pueden convertir a métricas, utilizando la fórmula :

$$1 \frac{m^2}{seg} = 2.22 \cdot 10^{-7} \text{ ts} - \frac{1.80 \cdot 10^{-4}}{\text{ts}} \quad (32 < \text{ts} < 1000)$$

CAPILARIDAD EN TUBOS .- El comportamiento de los líquidos en tubos delgados (tubos capilares, del latín capillus, cabello) depende de la tensión superficial y de la humidificación de los sólidos. Por ejemplo, cuando un tubo de vidrio se sumerge en agua, ésta se eleva en el tubo por encima del nivel hidrostático, mientras que si el tubo se sumerge en mercurio, el resultado es una depresión. La humidificación (o no humidificación) hace que la superficie del líquido se curve. En consecuencia, la tensión superficial causa una diferencia de Presión que se manifiesta a través de la superficie. Esta diferencia de Presión entre lados convexos y cóncavos para una superficie alabeada es:

$$Dp = p_1 - p_2 = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

donde σ es la tensión intersuperficial y r_1 , r_2 , son los radios de curvatura de superficie. Para tubos circulares, $r_1 = r_2 = r$, siendo r el radio de curvatura del menisco, nombre dado a la superficie interfacial. Para tubos alrededor de 0.25 cm. de diámetro, el menisco es casi esférico y $r = R/\cos \theta$.

Donde R es el radio del tubo y θ es el ángulo agudo medido en el punto de contacto líquido--sólido.

Para agua pura y vidrio limpio, θ está cerca de cero, mientras que para mercurio y vidrio, θ está alrededor de 50'.

ESTIMACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE UN GAS DE BAJA PRESIÓN .

Escencialmente, todas las técnicas de estimación de la viscosidad de un gas están basadas en la teoría de Chapman-Enskog o en la ley de los estados correspondientes.

Teoría de Chapman-Enskog .- Esta considera en detalle las interacciones entre las moléculas en colisión con una energía potencial incluida. Las ecuaciones son bien conocidas [Ref. 1] , pero su solución es generalmente muy difícil. Cada opción de un potencial intermolecular debe resolverse separadamente. En términos generales, la solución para la viscosidad se escribe como sigue:

$$\eta = \frac{5/16 (T^* MRT)^{1/2}}{(T^* \sigma^2) \Omega} = 26.69 \frac{(MT)^{1/2}}{\sigma^2 \Omega} \mu P \dots (1)$$

donde : η = viscosidad, μP ; M = Peso molecular ;

T = Temperatura, 'K ; σ = diámetro de esfera dura, A ;

Ω = Integral de colisión , es igual a uno si no hay atracción intermolecular. Se puede calcular con una energía potencial de interacción dada [Ref. 1] .

Para usar esta relación para estimar viscosidades, el diámetro de colisión σ y la integral de colisión Ω deben ser encontrados (como se verá más adelante). En la derivación de la ecuación anterior, Ω se obtiene como una función compleja de temperatura adimensional T^* .

La funcionalidad depende del potencial intermolecular que se elija. Para largas distancias de separación entre las moléculas (r), la energía potencial de interacción es negativa ; las moléculas se atraen mutuamente. En pequeñas distancias, la repulsión ocurre. Cuando las fuerzas de atracción y repulsión están balanceadas, se le denomina energía característica ϵ . Para cualquier curva de potencial, la temperatura adimensional T^* está relacionada con ϵ por :

$$T^* = \frac{k T}{\epsilon}$$

Donde k es la constante de Boltzmann.

El diámetro de colisión σ está definido como la distancia de separación cuando la energía potencial de interacción es igual a cero . La relación entre la energía potencial de separación $f(r)$ y la distancia de separación entre las moléculas es llamada función potencial intermolecular. De esta manera una función escrita usando solo los los parámetros ϵ y σ es un potencial de dos parámetros. Un ejemplo de este tipo es el potencial de Lennard-Jones 12-6 que se muestra a continuación :

$$f(r) = 4 \epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

(GASES NO POLARES)

Muchas otras funciones de potencial con parametros diferentes o adicionales también han sido propuestos. De cualquier manera, el elemento importante, es el que debe conocer $f(r)=g(r)$ en orden para obtener η en la ecuación (1) .

La ecuación de trabajo para η tendrá, en cualquier caso, tantos parámetros como sean necesarios para definir la relación original $f(r)$. Con el potencial de Lennard- Jones, la integral de colisión ha sido determinada por varios investigadores [Ref. 1,3]. Recientemente, Neufeld [Ref. 1], propuso una ecuación empirica la cual es conveniente para la aplicación en la computadora :

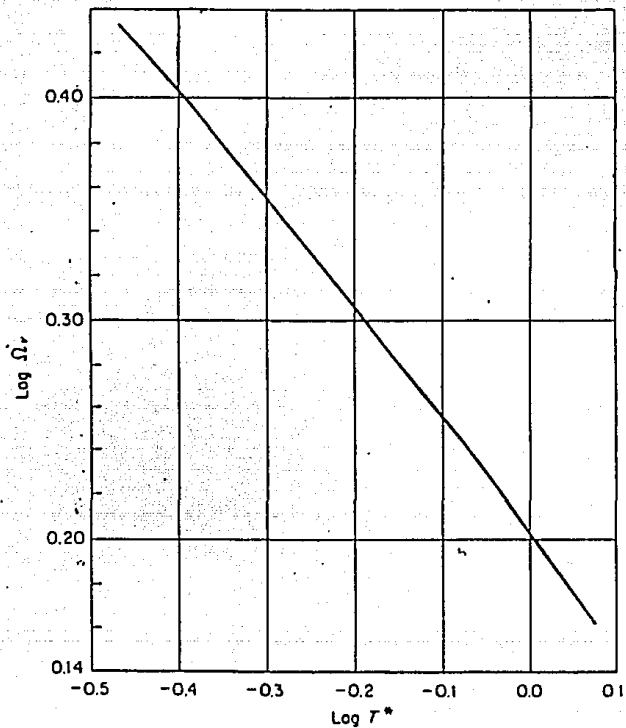
$$\eta = \frac{A}{T^* \wedge B} + \frac{C}{\exp D T^*} + \frac{E}{\exp F T^*}$$

Donde : $T^* = k T / C$ $A = 1.16145$ $B = 0.14874$

$C = 0.52487$ $D = 0.77320$ $E = 2.16178$ $F = 2.43787$

Esta ecuación es aplicable para $0.3 \leq T^* \leq 100$ con una desviación promedio de solo 0.064 % . Esta es recomendada de preferencia para otras relaciones analíticas sugeridas [Ref. 5,1] o nomográficas [Ref. 1], η decrece con un incremento en T^* , y fuera del rango de T^* , de interes para la mayoría de los Ingenieros Químicos ($0.3 < T^* < 2$), $\log \eta$ es casi lineal de $\log T^*$, como se muestra en la Figura 1, un hecho que será probado más tarde para tener consecuencias de interes.

Fig. 1 Efecto de la Temperatura sobre la integral de colisión de la Viscosidad de Lennard-Jones. [Ref.1]



Reichenberg [Ref. 1] sugirió que el $\log \eta$ es casi una función lineal del $\log T^*$.

$$\eta = a T^* \wedge n \dots\dots\dots (2)$$

Por lo tanto la ecuación (1) debe escribirse :

$$\eta = 26.69 M^{1/2} a^{-1} T^{0.5-n} \frac{(\epsilon/k)^n}{\sigma^2} \mu P$$

Aquí los parámetros σ y ϵ/k están combinados como un parámetro sencillo $(\epsilon/k)^n / \sigma^2$. Por lo tanto no hay forma de delinear valores específicos de ϵ/k y σ usando datos experimentales de viscosidad, por lo menos fuera del rango que la ecuación (2) tiene.

Como conclusión de esta discusión podemos decir que la ecuación (1) puede ser usada para calcular la viscosidad de un gas aunque la opción fijada de ϵ/k y σ tenga muy poca relación con las propiedades moleculares. Habrá un número infinito de opciones fijadas aceptables, tantas hasta que el rango de temperatura no sea tan amplio.

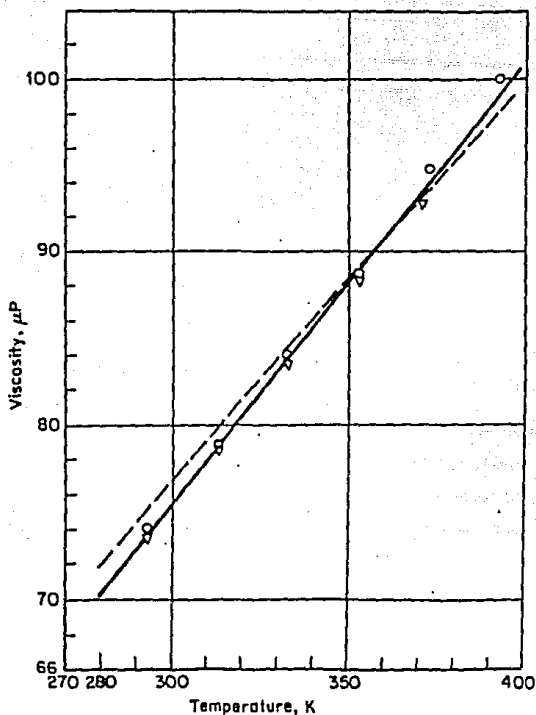


Fig. 2 Comparación de la viscosidad del gas a baja presión calculada (Ec. Lennard-Jones), con la experimental, del n-Butano. [Ref.11]

Para usar la ecuación (1) para estimar viscosidades de gases no polares, los valores de ϵ/k y σ pueden encontrarse para muchas sustancias en el apéndice C (Reid-Prausnitz, Properties of liquids and gases). Si no están en esta tabulación, estos parámetros pueden ser aproximados por las ecuaciones siguientes usando constantes críticas y el factor acéntrico :

$$\begin{aligned} \sigma (P_c/T_c)^{1/3} &= 2.3551 - 0.087 \omega \\ \epsilon / K T_c &= 0.7915 + 0.1693 \omega \end{aligned}$$

Al obtener los valores mediante estas ecuaciones se tienen errores ligeramente grandes, del 1 al 3 % .

GASES POLARES .- Para moléculas polares, la función potencial más conveniente será la sugerida por Stockmayer [Ref.1] En esencia esta función es idéntica a la forma de Lennard-Jones, excepto por un término adicional debido a las interacciones permanentes dipolo-dipolo entre moléculas. Si hay dipolos no permanentes, la relación de Stockmayer simplifica la forma de Lennard-Jones. Monchick y Mason [Ref.1] han obtenido valores aproximados para μ usando esta función potencial, y éstos se muestran en la Tabla 1. Para obtener μ se requiere de los valores de ϵ/k y d . d es un parámetro polar definido como :

$$d = \mu_p^2 / 2 \epsilon \sigma^3$$

μ_p = momento dipolar; ϵ y d = parámetros de Stockmayer.

Tabla 1. Integrales de Colisión Ωv para la viscosidad calculada mediante el potencial de Stockmayer. [Ref. 1]

$$\delta = \frac{(\text{momento dipolar})^2}{2\epsilon\sigma^3} \quad T^* = \frac{kT}{\epsilon}$$

$T^* \backslash \delta$	0	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5
0.1	4.1005	4.266	4.833	5.742	6.729	8.624	10.34	11.89
0.2	3.2626	3.305	3.516	3.914	4.433	5.570	6.637	7.618
0.3	2.8309	2.836	2.936	3.168	3.511	4.329	5.126	5.874
0.4	2.5310	2.522	2.586	2.749	3.004	3.640	4.282	4.895
0.5	2.2837	2.277	2.329	2.460	2.665	3.187	3.727	4.249
0.6	2.0838	2.081	2.130	2.243	2.417	2.862	3.329	3.786
0.7	1.9220	1.924	1.970	2.072	2.225	2.614	3.028	3.435
0.8	1.7902	1.795	1.840	1.934	2.070	2.417	2.788	3.156
0.9	1.6823	1.689	1.733	1.820	1.944	2.258	2.596	2.933
1.0	1.5929	1.601	1.644	1.725	1.838	2.124	2.435	2.746
1.2	1.4551	1.465	1.504	1.574	1.670	1.913	2.181	2.451
1.4	1.3551	1.365	1.400	1.461	1.544	1.754	1.989	2.228
1.6	1.2800	1.289	1.321	1.374	1.447	1.630	1.838	2.053
1.8	1.2219	1.231	1.259	1.306	1.370	1.532	1.718	1.912
2.0	1.1757	1.184	1.209	1.251	1.307	1.451	1.618	1.795
2.5	1.0933	1.100	1.119	1.150	1.193	1.304	1.435	1.578
3.0	1.0388	1.044	1.059	1.083	1.117	1.204	1.310	1.428
3.5	0.99963	1.004	1.016	1.035	1.062	1.133	1.220	1.319
4.0	0.96988	0.9732	0.9830	0.9991	1.021	1.079	1.153	1.236
5.0	0.92676	0.9291	0.9360	0.9473	0.9628	1.005	1.058	1.121
6.0	0.89616	0.8979	0.9030	0.9114	0.9230	0.9545	0.9955	1.044
7.0	0.87272	0.8741	0.8780	0.8845	0.8935	0.9181	0.9505	0.9893
8.0	0.85379	0.8549	0.8580	0.8632	0.8703	0.8901	0.9164	0.9482
9.0	0.83795	0.8388	0.8414	0.8456	0.8515	0.8678	0.8895	0.9160
10.0	0.82435	0.8251	0.8273	0.8308	0.8356	0.8493	0.8676	0.8901
12.0	0.80184	0.8024	0.8039	0.8065	0.8101	0.8201	0.8337	0.8504
14.0	0.78363	0.7840	0.7852	0.7872	0.7899	0.7976	0.8081	0.8212
16.0	0.76834	0.7687	0.7696	0.7712	0.7733	0.7794	0.7878	0.7983
18.0	0.75518	0.7554	0.7562	0.7575	0.7592	0.7642	0.7711	0.7797
20.0	0.74364	0.7438	0.7445	0.7455	0.7470	0.7512	0.7569	0.7642
25.0	0.71982	0.7200	0.7204	0.7211	0.7221	0.7250	0.7289	0.7339
30.0	0.70097	0.7011	0.7014	0.7019	0.7026	0.7047	0.7076	0.7112
35.0	0.68545	0.6855	0.6858	0.6861	0.6867	0.6883	0.6905	0.6932
40.0	0.67232	0.6724	0.6726	0.6728	0.6733	0.6745	0.6762	0.6781
50.0	0.65089	0.6510	0.6512	0.6513	0.6516	0.6521	0.6534	0.6546
75.0	0.61397	0.6141	0.6143	0.6145	0.6147	0.6148	0.6148	0.6147
100.0	0.58870	0.5889	0.5891	0.5890	0.5893	0.5891	0.5895	0.5883

En la Tabla 2 se listan valores de ϵ/k , σ y d para unas cuantas moléculas polares representativas. Brokaw [Ref.1], en un amplio estudio del uso del potencial de Stockmayer, sugirió que a pesar de usar la Tabla 1, uno se puede aproximar más a n_v con :

$$n_v (\text{Stockmayer}) = n_v (\text{Lennard-Jones}) + 0.2d^2 / T^* \dots (3)$$

Si los parámetros de potencial no se encuentran en la Tabla 2, Brokaw recomienda que deben ser estimadas de la siguiente manera :

$$\sigma = (1.585 V_b / (1 + 1.3 d^2))^{1/3}$$

$$\epsilon/k = (1.18) (1 + 1.3 d^2) T_b$$

$$d = (1.94) (10)^{3/2} \mu_p / V_b T_b$$

Donde σ está en angstroms, ϵ/k y T_b (temperatura en el punto de ebullición) están en Kelvins, μ_p está en debyes, y V_b (volumen de liquido molar en el punto normal de ebullición) está en centímetros cúbicos por gramo mol.

Los gases polares normalmente se definen como aquellos que tienen $d \geq 0.1$; algunos prefieren incluir compuestos con $d \geq 0.05$. Nuevamente los errores encontrados fueron generalmente menores del 2% si σ y ϵ/k se obtuvieron de la Tabla 2. Errores muy grandes se obtuvieron cuando σ y ϵ/k fueron estimadas.

Tabla 2 Parámetros del Potencial de Stockmayer. [Ref. 1]

	Momento Dipolar μ_p , debyes	σ , Å	$\frac{\epsilon}{k'}$ K	δ
H ₂ O	1.85	2.52	775	1.0
NH ₃	1.47	3.15	358	0.7
HCl	1.08	3.36	328	0.34
HBr	0.80	3.41	417	0.14
HI	0.42	4.13	313	0.029
SO ₂	1.63	4.01	347	0.42
H ₂ S	0.92	3.49	343	0.21
NOCl	1.83	3.53	690	0.4
CHCl ₃	1.013	5.31	355	0.07
CH ₂ Cl ₂	1.57	4.52	483	0.2
CH ₃ Cl	1.87	3.94	414	0.5
CH ₃ Br	1.80	4.25	382	0.4
C ₂ H ₅ Cl	2.03	4.45	423	0.4
CH ₃ OH	1.70	3.69	417	0.5
C ₂ H ₅ OH	1.69	4.31	431	0.3
n-C ₃ H ₇ OH	1.69	4.71	495	0.2
i-C ₃ H ₇ OH	1.69	4.64	518	0.2
(CH ₃) ₂ O	1.30	4.21	432	0.19
(C ₂ H ₅) ₂ O	1.15	5.49	362	0.08
(CH ₃) ₂ CO	1.20	4.50	549	0.11
CH ₃ COOCH ₃	1.72	5.04	418	0.2
CH ₃ COOC ₂ H ₅	1.78	5.24	499	0.16
CH ₃ NO ₂	2.15	4.16	290	2.3

MÉTODOS DE LOS ESTADOS CORRESPONDIENTES .

Muchos métodos de estimación de la viscosidad de un gas pueden ser descritos en base a la simple teoría de la esfera dura por la ecuación siguiente :

$$\eta = K \frac{T^{1/2} M^{1/2}}{\sigma^2}$$

Si σ^3 es asociada con V_c , y V_c se asume que es proporcional a RT_c/P_c , entonces

$$\eta_r = f(T_r)$$

donde η_r es una viscosidad adimensional

$$\eta_r = \frac{\eta}{M^{1/2} P_c^{2/3} / (RT_c)^{1/6}}$$

Esta reducción fué propuesta por Trautz y discutida por Golubev [Ref.11] quien propuso las siguientes ecuaciones de trabajo :

$$\eta = \eta_c^* Tr^{0.965} \quad Tr < 1$$

$$\eta = \eta_c^* Tr^{0.71+0.29/Tr} \quad Tr > 1$$

Donde η_c^* es la viscosidad a la temperatura crítica pero a baja presión :

$$\eta_c^* = 3.5 M^{1/2} P_c^{2/3} / T_c^{1/6}$$

Donde M es el peso molecular ; P_c es la presión crítica en atm.; T_c es la temperatura crítica en K'; η es la viscosidad, μP .

Relaciones similares fueron propuestas por Thodos y colaboradores [Ref. 1] :

NO POLARES

$$\eta \delta = 4.610 Tr^{0.618} - 2.04 e^{-0.449 Tr} + 1.94 e^{-4.058 Tr} + 0.1$$

GASES POLARES

Para tipos de hidrógenos ligados, Tr < 2.0

$$\eta \delta = (0.755 Tr - 0.055) Z_c^{-5/4}$$

Para tipos de hidrógenos no ligados, Tr < 2.5

$$\eta \delta = (1.90 Tr - 0.29)^{4/5} Z_c^{-2/3}$$

Donde : $\delta = T_c^{1/6} M^{-1/2} P_c^{-2/3}$

Z_c es el factor de compresibilidad en el punto crítico.

Las ecuaciones de Thodos no deben de usarse para hidrógeno, helio, o los gases diatómicos halogenados.

Reichenberg ha sugerido una relación de los estados correspondientes diferente [Ref. 1] :

$$\eta = \frac{a^* T_r}{[1 + 0.36 T_r (T_r - 1)]^{1/6}} \mu P$$

En muchos casos, el parámetro a^* es numéricamente tan similar a η_c^* .

De cualquier manera, para compuestos orgánicos Reichenberg recomienda usar :

$$a^* = \frac{M^{1/2} T_c}{\sum_i n_i C_i} \mu P$$

Donde M es el peso molecular; T_c es la temperatura crítica en 'K ; n_i es el número de grupos atómicos de tipo i ésimo .

Contribuciones de grupo para C_i se muestran en la Tabla 3 . Actualmente solo compuestos orgánicos pueden ser tratados .

RECOMENDACIONES PARA ESTIMAR LA VISCOSIDAD DE GASES PUROS A BAJA PRESIÓN .

Gases No Polares .- Si los valores de ϵ/k y σ son obtenidos del apéndice C (Reid and Prausnitz, Properties of liquids and gases), hay que usar estas constantes con la ecuación (1) para calcular la viscosidad. Los errores son rara vez mayores que el 1 % .

Tabla 3 Valores de las contribuciones de Grupo C₁ Para la Estimación de σ^* en micropoisés. [Ref.1]

Grupo	Contribución C ₁
-CH ₃	9.04
>CH ₂ (sin anillo)	6.47
>CH- (sin anillo)	2.67
>C (sin anillo)	-1.53
=CH ₂	7.68
=CH- (sin anillo)	5.53

>C= (sin anillo)	1.78
$\equiv\text{CH}$	7.41
$\equiv\text{C-}$ (sin anillo)	5.24
>CH_2 (anillo)	6.91
>CH- (anillo)	1.16
>C (anillo)	0.23
-CH- (anillo)	5.90
>C= (anillo)	3.59
-F	4.46
-Cl	10.05
-Br	12.83
-OH (alcoholes)	7.96
>O (sin anillo)	3.59
>C=O (sin anillo)	12.02
-CHO (aldeidos)	14.02
-COOH (Acidos)	18.65
-COO- (esters) o HCOO (Formatos)	13.41
-NH_2	9.71
>NH (sin anillo)	3.68
-N- (anillo)	4.97
-CN	18.13
>S (anillo)	8.86

Si los valores no son encontrados en el apéndice C, hay que usar la forma de los estados correspondientes de Thodos o la forma de contribución de grupo de los estados correspondientes de Reichenberg. El error esperado es aún bajo y normalmente está entre un 1 % y 3 % .

Gases Polares .- El método más adecuado es la ecuación (1) con la integral de colisión obtenida de la ecuación (3), obteniendo los valores de ϵ/k , σ y d en la tabla 2 . El error esperado está entre 0.5% y 1.5% . Si el compuesto no se encuentra en la tabla 2, se recomienda usar la relación de Reichenberg con la tabla 3 . Los errores varían, pero usualmente son menores del 4% .

VISCOSIDADES DE MEZCLAS DE GASES A BAJAS PRESIONES .

Desafortunadamente, la viscosidad de una mezcla de gas es rara vez una función lineal de composición, como se puede ver en la figura 3 . De cualquier manera, debe de haber un máximo donde la viscosidad de mezcla exceda el valor de un componente puro; Por ejemplo el sistema 4, amonio-hidrógeno (Fig. 3).

Ningun caso de un mínimo de viscosidad ha sido reportado. Tendencias como las mostradas en el sistema amonio-hidrógeno ocurre más a menudo en mezclas polar-No polar [Ref. 1], donde las viscosidades del componente puro no son muy diferentes.

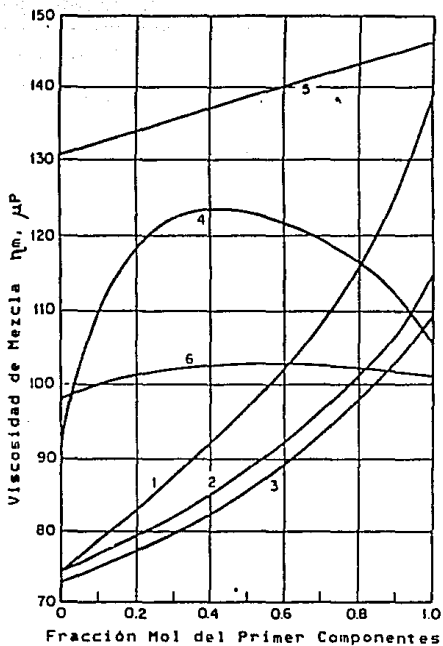


Fig. 3 Viscosidades de Mezcla de Gases.

No.	Sistema	T, K	Ref.
1	H ₂ S - Etil Ether	331	1
2	H ₂ S - Amoniaco	331	1
3	Metano - n-Butano	293	7
4	Amoniaco - Hidrógeno	306	1
5	Amoniaco - Meril Amina	423	1
6	Etileno - Amoniaco	293	1

Las máximas serán más pronunciadas cuanto más difiera el peso molecular promedio de la unidad .

La rigurosa teoría cinética de Chapman-Enskog puede ser extendida para determinar la viscosidad de una mezcla de gas multicomponente de baja presión [Ref.1,4]. Las expresiones finales son relativamente complicadas y consisten del promedio de dos determinantes, las cuales contienen elementos involucrado fracciones molares, pesos moleculares, viscosidades de componentes puros, temperaturas, y varias integrales de colisión.

Despreciando efectos de segundo orden, la solución rigurosa puede ser aproximada en series como :

$$\eta_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \eta_i}{\sum_{j=1}^n y_j \phi_{ij}} \dots \dots \dots (4)$$

Para un sistema binario de 1 y 2, donde $\eta_1 > \eta_2$, si $(\eta_1/\eta_2) \neq \rho_{12} \neq \rho_{21} < 1$, hay una viscosidad máxima en alguna composición entre el componente puro 1 y el componente puro 2.

APROXIMACIÓN DE WILKE PARA ρ_{ij} - Wilke [Ref.1] usó el modelo de la teoría cinética de Sutherland para obtener :

$$\rho_{ij} = \frac{[1 + (\eta_i/\eta_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}]^2}{(8 [1 + (M_i/M_j)^{1/2}])^{1/2}} \quad (5)$$

ρ_{ij} puede ser encontrado por : $\rho_{ji} = \frac{\eta_j}{\eta_i} \frac{M_i}{M_j} \rho_{ij}$

Para un sistema binario de 1 y 2, con las ecuaciones anteriores obtenemos :

$$\eta_m = \frac{y_1 \eta_1}{y_1 + y_2 \rho_{12}} + \frac{y_2 \eta_2}{y_2 + y_1 \rho_{21}}$$

Donde η_m = viscosidad de mezcla ; η_1 y η_2 = viscosidades de los componentes puros ; y_1 , y_2 = Fracciones molares

$$\rho_{12} = \frac{[1 + (\eta_1/\eta_2)^{1/2} (M_2/M_1)^{1/4}]^2}{(8 [1 + (M_1/M_2)^{1/2}])^{1/2}}$$

$$\rho_{21} = \rho_{12} \frac{\eta_2}{\eta_1} \frac{M_1}{M_2}$$

Wilke [Ref.1] comparó valores calculados con datos en 17 sistemas binarios y reportó una desviación promedio de menos de 1% ;muchos casos en los cuales η_m pasó el máximo fue incluida .

Muchos otros investigadores han probado este método [Ref.1] y en muchos casos solo las mezclas no polares fueron comparadas, y muy buenos resultados fueron obtenidos. Para algunos sistemas conteniendo hidrógeno como un componente, una concordancia menos satisfactoria fue notada . La aproximación de Wilke ha probado con exactitud aún para las mezclas gaseosas polar-polar de alcoholes alifáticos [Ref.1]. La excepción principal aparece en aquellos casos donde $M_i \gg M_j$ y $\eta_i \gg \eta_j$. Omitiendo estos casos, una comparación de los valores experimentales y los calculados [Ref.1 (T.9-5)] indican que el error es generalmente menor del 2%. Para mezclas que involucran hidrógeno o helio como un componente, Reichenberg ha desarrollado una correlación más exacta y más compleja [Ref. 1].

APROXIMACIÓN PARA β_{ij} DE HERNING Y ZIPPERER .- Como una expresión aproximada para β_{ij} la siguiente ecuación fue propuesta [Ref.1] :

$$\beta_{ij} = (M_i / M_j)^{1/2} = 1 / \beta_{ji} \dots\dots (6)$$

En la figura 4, $(M_i/M_j)^{1/2}$ está graficada contra los valores de β_{ij} determinados de la ecuación (5). A pesar de que la línea cortada indica que β_{ij} en la ecuación (6) es una pobre aproximación de β_{ij} de Wilke, hay un ajuste un tanto remarcable si uno examina la línea continua a través de los datos. Esta línea debe ser expresada como :

$$\beta_{12}(\text{Wilke}) = 1.45 (M_2/M_1)^{1/2} - 0.505$$

Esta simple relación no es aplicable para sistemas que contengan hidrógeno, por ejemplo H₂-NH₃ o H₂-N₂. En el resto de los casos de prueba [Ref. 1(T.9-5)], la ecuación (6) demuestra ser bastante confiable.

APROXIMACIÓN PARA β_{ij} DE BROKAW .- En un particular estudio completo de las viscosidades de mezclas de gases, Brokaw [Ref.1] propuso que β_{ij} puede ser obtenida de :

$$\beta_{ij} = (\eta_i/\eta_j)^{1/2} S_{ij} A_{ij}$$

El término S_{ij} está fijado igual a la unidad si i y j son No polares. Para gases polares, la forma de determinar S_{ij} se verá más adelante. A_{ij} está en función únicamente de los pesos moleculares promedios :

$$A_{ij} = m_{ij} M_{ij}^{-1/2} \left[1 + \frac{M_{ij} - M_{ij} \sim 0.45}{2(1+M_{ij}) + \frac{(1+M_{ij} \sim 0.45) m_{ij} \sim 1/2}{1 + m_{ij}}} \right]$$

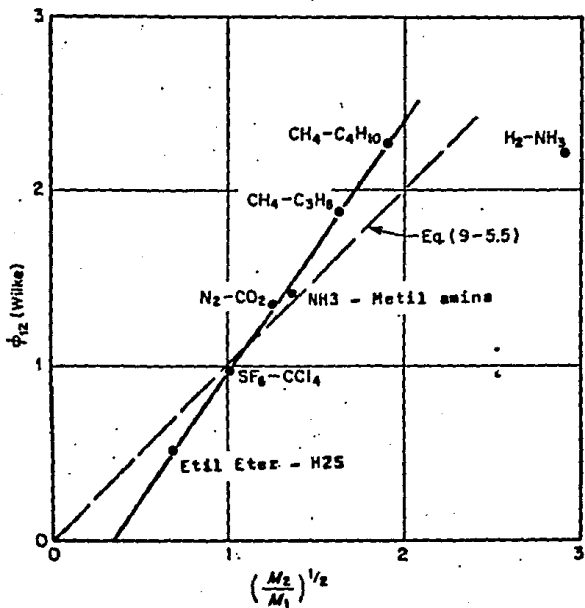


Fig. 4 Efecto del Peso Molecular sobre ϕ_{12} . [Ref. 12]

$$\text{con } m_{ij} = [4 / ((1 + M_{ij}^{-1}) (1 + M_{ij}))]^{0.25}$$

$$M_{ij} = \frac{M_i}{M_j}$$

A_{ij} puede ser determinada rápidamente con una computadora. También está graficada como una función M_i/M_j en las figuras 5 y 6. A_{ij} puede ser aproximada por:

$$A_{ij} = [M_i/M_j]^{-0.37} \cdot 0.4 \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{1.33}$$

con un error menor de 1% fuera de este rango de pesos moleculares promedios.

Para mezclas que contengan gases polares, se requiere de los parámetros d y T^* . Los valores de d pueden ser encontrados en la Tabla 2. T^* es igual a kT/ϵ , y nuevamente ϵ se muestra para muchos componentes polares en la Tabla 2.

$$S_{ij} = S_{ji} = \frac{1 + (T^*i T^*j)^{1/2} + (d_i d_j / 4)}{[1 + T^*i + (d_i / 4)]^{1/2} [1 + T^*j + (d_j / 4)]^{1/2}}$$

esta ecuación solo deberá usarse si d_i o $d_j > 0.1$.

Si ambas son menores que 0.1, $S_{ij} = S_{ji} = 1.0$.

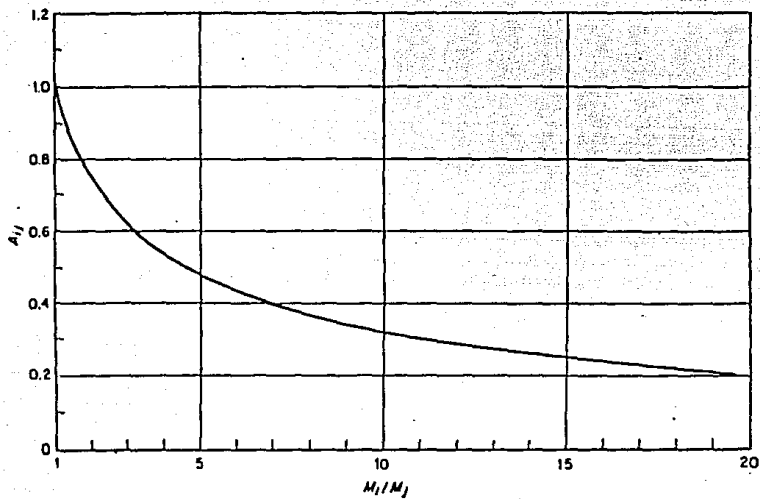


Fig. 5 Valores de A_{ij} de Brokaw Para $1 < M_i/M_j < 20$. [Ref.13]

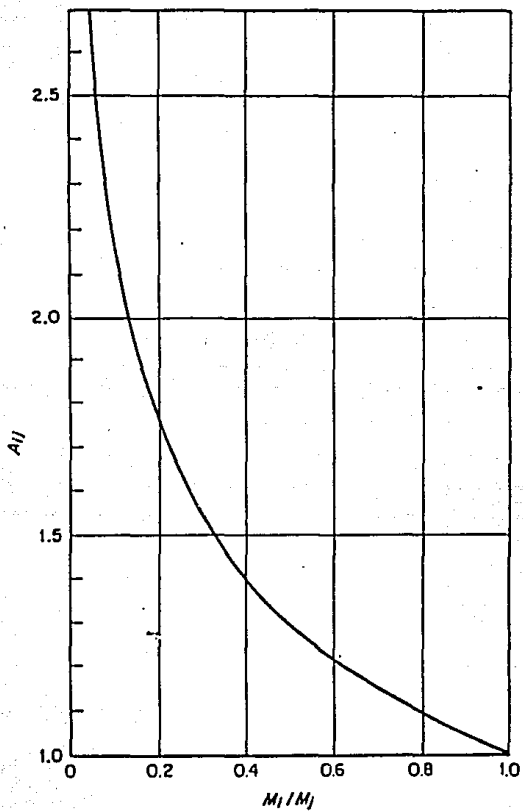


Fig. 6 Valores de A_{ij} de Brokaw Para $0.05 < M_i/M_j < 1$. [Ref. 1]

Comparando los errores encontrados por el método de Wilke, ideado para mezclas que contengan componentes polares, con los encontrados en el método de Brokaw para la aproximación de β_{ij} , podemos decir que el método de Brokaw es definitivamente superior. Muchos otros sistemas fueron comparados con el de Brokaw, y en general, los errores menores del 2% fueron encontrados por una gran variedad de mezclas no polares y polares.

CORRELACIONES DE LOS ESTADOS CORRESPONDIENTES .- Cualquiera de los diversos métodos de los estados correspondientes, descritos anteriormente para la estimación de viscosidades de gases puros pueden también ser usados para mezclas de gases . De cualquier manera, deben encontrarse M , P_c , y T_c para la mezcla . Por ejemplo, Dean y Stiel [Ref.1] propusieron una relación esencialmente igual a la propuesta para gases puros :

$$\eta_m \bar{E}_m = \begin{cases} (3.40) Tr_m^{8/9} & Tr \leq 1.5 \\ (16.68)(0.1338 Tr - 0.0932)^{5/9} & Tr > 1.5 \end{cases}$$

Donde η_m = viscosidad de mezcla , μP .

$$\bar{E}_m = \frac{T_{cm}^{1/6}}{P_{cm}^{2/3} \left(\sum y_i M_i \right)^{1/2}} \quad Tr_m = \frac{T}{T_{cm}}$$

T_{cm} y P_{cm} se determinan con las reglas de mezclado de Prausnitz y Gunn :

$$T_{cm} = \sum_j y_i T_{cj} \quad 0.5 \left(\frac{T_{ci}}{T_{cj}} \right)^{0.2}$$

$$P_{cm} = \frac{R \left(\sum_j y_j z_{cj} \right) T_{cm}}{\sum_j y_j V_{cj}} \quad 0.5 \left(\frac{P_{ci}}{P_{cj}} \right)^{0.2}$$

Para los sistemas no polares, el método de Dean y Stiel da buenos resultados pero con errores normalmente más grandes que los que dan con las técnicas de Wilke y Brokaw. No hay tampoco forma de emplear valores de viscosidad de componentes puros, los cuales deberían de estar disponibles.

De manera análoga otros métodos de los estados correspondientes pueden ser usados para predecir las viscosidades de mezclas. Both Yoon y Thodos, y Hattikudur y Thodos [Ref.1] han propuesto otras maneras de encontrar μ_m para ambas mezclas de gases, No polar y Polar-No polar. Ninguno de estos métodos de los estados correspondientes, de cualquier forma, parecen ser tan exactos y tan generales como aquellos empleados en la ecuación (4) con una estimación confiable de μ_{ij} .

OTROS MÉTODOS PARA ESTIMAR LA VISCOSIDAD DE MEZCLA DE GASES DE PRESIÓN BAJA .- Strunk [Ref.1] ha propuesto que la ecuación (4) sea usada . Para determinar σ y $\nu(1+m)$ como una función de composición, existen reglas de combinación especificadas. Esta técnica es simple, y como es un método que está limitado a mezclas no polares y es similar en exactitud al de Wilke, no se le da gran importancia .

Saxena y sus colaboradores [Ref.1] también tomaron la ecuación (4), como un punto de partida para desarrollar una correlación, pero al menos una viscosidad de la mezcla se requiere para obtener otras estimadas ; generalmente se obtienen buenos resultados si se introduce tal viscosidad de la mezcla.

RECOMENDACIONES PARA LAS VISCOSIDADES DE GASES A BAJA PRESIÓN .- La ecuación (4) deberá usarse con el parámetro δ_{ij} obtenido, ya sea de la ecuación de Wilke o de la ecuación de Brokaw. éste último es probablemente preferido, si cualquiera de los componentes son polares; éste es también algo más complejo. Para componentes polares, el momento dipolar deberá conocerse. Para mezclas no polares, errores menores de 2% a 3% son encontrados generalmente. Para mezclas polar-polar o no polar-polar, los errores rara vez exceden del 3% al 4% . Los únicos sistemas que presentan ocasionalmente problemas son aquellos con un máximo pronunciado en la viscosidad de la mezcla. Dicha máxima es encontrada en sistemas binarios con $(\eta_1/\eta_2) \delta_1 \delta_2$ (1) y donde $\eta_1 > \eta_2$.

ESTIMACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE UN LIQUIDO DE BAJA TEMPERATURA .

Un gran número de documentos han sido publicados proponiendo formas para estimar la viscosidad de líquidos de baja temperatura ($T_r < 0.75$ a 0.80) cuando no hay datos experimentales disponibles. De todos los métodos de predicción propuestos, cuatro de los mejores y más generales son presentados a continuación : no son particularmente confiables y todos son empíricos.

Valores estimados de viscosidades de líquidos son comparados con valores experimentales, y en muchos casos grandes errores se pueden ver, y esto es comprendido que, donde sea posible, los valores experimentales de la viscosidad deben ser buscados antes de recurrir a un método de estimación. En el apéndice A (Reid and Prausnitz, Properties of liquids and gases), se listan muchos valores de las constantes B y T_0 para usarse en la ecuación (7). Estas constantes pueden ser usadas para calcular viscosidades de líquidos con razonable confianza de cerca de 20 a 30°C por encima del punto de congelación hasta un valor de $T_r = 0.75$.

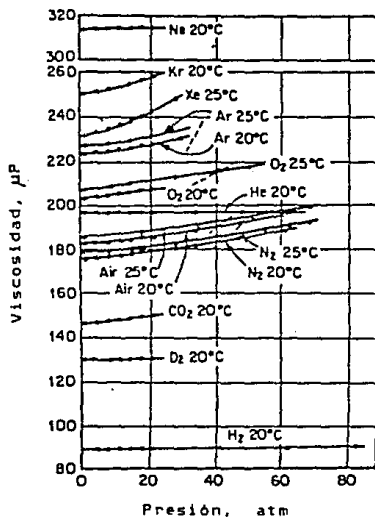
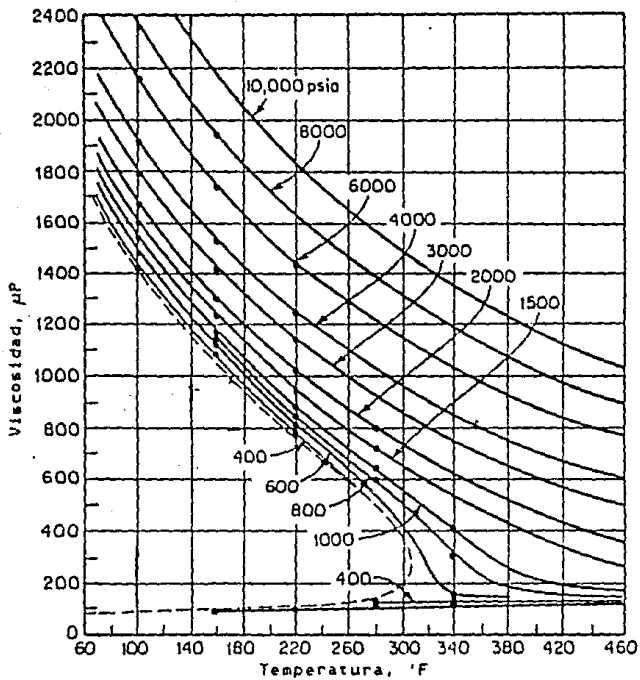
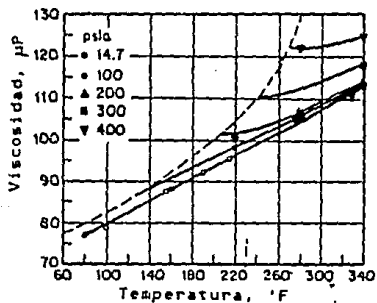


Fig. 7 Viscosidad de Gases de Baja Presión Reducida o Alta Temperatura Reducida . [Ref.1]



(a)



(b)

Fig. 8 (a) n-Butano viscosidad vs. Temperatura; (b) n-Butano viscosidad vs. Temperatura a Bajas Presiones. [Ref. 11]

MÉTODO DE ORRICK Y ERBAR [Ref.1] .- Este método emplea la técnica de contribución de grupo para estimar A y B en la siguiente ecuación :

$$\ln \frac{\eta_l}{\rho_l M} = A + \frac{B}{T}$$

η_l = Viscosidad del líquido, cP ; M = Peso molecular
 ρ_l = densidad del líquido a 20°C , g/cm³ ; T = Temperatura, K

Las contribuciones de grupo para obtener A y B están dadas por la Tabla 4. Para líquidos que tienen punto de ebullición normal abajo de 20°C, se usa el valor de ρ_l a esta temperatura; para líquidos cuyos puntos de congelación están por encima de 20°C, debe emplearse el valor de ρ_l en el punto de fusión. Compuestos que contengan nitrógeno o sulfuro no pueden ser tratados. Orrick y Erbar probaron este método para 188 líquidos orgánicos. Los errores variaron enormemente, pero ellos reportaron una desviación promedio de 15% .

MÉTODO DE THOMAS [Ref.1] .- Thomas ha sugerido que las viscosidades de líquidos a temperaturas abajo del punto normal de ebullición pueden ser calculadas mediante la expresión empírica siguiente :

$$\log [8.569 (\eta_l / \rho_l^{1/2})] = \theta [(1 / T_r) - 1]$$

Tabla 4 Contribuciones de Grupo de Orrick y Erbar para A y B. [Ref.1]

Grupo	A	B
Átomos de Carbono	$-(6.95 + 0.21n)$	$275 + 99n$
$\begin{array}{c} | \\ R-C-R \\ | \\ R \end{array}$	-0.15	35
$\begin{array}{c} R \\ | \\ R-C-R \\ | \\ R \end{array}$	-1.20	400
Doble Ligadura	0.24	-90
Anillo de 5	0.10	32
Anillo de 6	-0.45	250
Anillo Aromático	0	20
Sustitución Orto	-0.12	100
Sustitución Meta	0.05	-34
Sustitución Para	-0.01	-5
Clorados	-0.61	220
Bromados	-1.25	365
Yodados	-1.75	400
-OH	-3.00	1600
-COO-	-1.00	420
-O-	-0.38	140
$\begin{array}{c} | \\ -C=O \end{array}$	-0.50	350
-COOH	-0.90	770

θ = constante de viscosidad calculada de los valores de la
Tabla 5.

T_r = Temperatura reducida = T / T_c

Valores experimentales de viscosidades de líquidos son comparadas con valores calculados [Ref.1(T.9-12)]. Los errores son muy variables pero generalmente indica que los aromáticos (excepto Benceno), compuestos monohalogenados, insaturados, y n-parafinas de alto peso molecular, pueden ser tratados con errores normalmente menores del 15%. Este método no debe de ser usado para alcoholes, ácidos, naftenos, heterocíclicos, aminas, aldeidos, o compuestos multihalogenados.

MÉTODO DE MORRIS [Ref.1] .- Otro método de contribución de grupo para la estimación de viscosidades de líquidos fue presentado por Morris, quien propuso :

$$\log \frac{\eta_i}{\eta^+} = J (1/T_r - 1)$$

El parámetro η^+ es una constante para cada clase de compuesto, y los valores están listados en la Tabla 6. De la ecuación anterior deberá aparecer que η^+ será la viscosidad en el punto crítico, pero desde que ésta relación no es aplicable a altas Temperaturas reducidas, η^+ es mejor interpretarla como una constante empírica.

Tabla 5 Contribuciones Estructurales para Calcular θ en el Método de Thomas. [Ref.1]

C	-0.462	Doble Ligadura	0.478
H	0.249	C_4H_4	0.385
O	0.054	S	0.043
Cl	0.340	CO	0.105†
Br	0.326	CN	0.381†
I	0.335		

Tabla 6 Viscosidad Pseudocrítica η^+ [Ref.1]

η^+ en centipoises

Hidrocarburos	0.0875
Hidrocarburos Halogenados	0.148
Derivados del Benceno	0.0895
Derivados del Benceno Halogenados	0.123
Alcoholes	0.0819
ácidos Orgánicos	0.117
Etheres, Aldehidos, Cetonas	0.096
Fenoles	0.0126
Diversos	0.10

J es una función de la estructura y es calculada por :

$$J = [0.0577 + \sum (b_i n_i)]^{1/2}$$

b_i = contribución de grupo determinada de la Tabla 7 .

n_i = número de veces que el grupo aparece en la molécula.

Morris probó este método con 70 compuestos orgánicos y reportó un error promedio del 12% . Normalmente menos exactitud es encontrada en las temperaturas más bajas y para los miembros más bajos de series homologas. También pocas pruebas fueron hechas con estructuras ramificadas para indicar la utilidad del método en tales casos .

MÉTODO DE VAN VELZEN, CARDOZO Y LANGEKAMP .- En un estudio detallado inusual del efecto de la estructura en las viscosidades de los líquidos, Van Velzen [Ref.12] propuso la siguiente ecuación :

$$\log \eta_l = B (1/T - 1/T_0) \dots\dots (7)$$

η_l = Viscosidad del líquido, cP.

T = Temperatura, K .

Tabla 7 Contribuciones Estructurales Para J. (Ref. 13)

$$J = \sqrt{0.0577 + \sum (b_i m_i)}$$

Grupo	b_i	Grupo	b_i
CH ₃ , CH ₂ , CH	0.0825	CH ₂ Miembro de Anillo Saturado	0.1707
Halogeno Sustituido CH ₃	0.0	CH ₃ , CH ₂ , CH Anillo Adyacente	0.0520
Halogeno Sustituido CH ₂	0.0893	NO ₂ Anillo Adyacente	0.4170
Halogeno Sustituido CH	0.0667	NH ₂ Anillo Adyacente	0.7645
Halogeno Sustituido C	0.0	F, Cl Anillo Adyacente	0.0
Br	0.2058	OH Para Alcoholes	2.0446
Cl	0.1470	COOH Para Acidos	0.8896
F	0.1344	C=O Para Cetonas	0.3217
I	0.1908	O=C-O Para Acetatos	0.4369
Doble Ligadura	-0.0742	OH Para Fenoles	3.4420
C ₆ H ₄ Anillo Benceno	0.3558	-O- Para Ethers	0.1090
H Adicional en Anillo	0.1446		

B y To están relacionadas con la estructura. Para determinar estos parámetros, uno debe primero encontrar el largo equivalente de la cadena N*, donde :

$$N^* = N + \sum_i E AN_i$$

N es el número actual de átomos de Carbono en la molécula, y AN representa las contribuciones estructurales [Ref.1(T.9-11)]. Si el grupo estructural o funcional ANi aparece ni veces en la molécula, ni ANi correcciones deben agregarse .

En la tabulación de ANi contribuciones, algunos valores deberán usarse cada vez que el grupo funcional aparezca; otros valores representan correcciones adicionales que deberán usarse para modificar la contribución básica de grupo.

El valor de N* es entonces usado para determinar B y To en la ecuación (7).

Para To :

$$To = \begin{cases} 28.86 + 37.439 N^* - 1.3547 N^{*2} + 0.02076 N^{*3} & N^* \leq 20 \\ 8.164 N^* + 238.59 & N^* > 20 \end{cases}$$

Para B :

$$B = B_a + \sum_i \Delta B_i$$

$$B_a = \begin{cases} 24.79 + 66.885 N^* - 1.3173 N^{*2} - 0.00377 N^{*3} & N^* \leq 20 \\ 530.59 + 13.740 N^* & N^* > 20 \end{cases}$$

Y ΔB_i puede ser determinada de la suma de contribuciones. Aun pensando que un grupo funcional aparecerá más de una vez en un compuesto, la contribución de ΔB_i es aplicada solo una vez.

Los valores de B y T_0 encontrados para cualquier compuesto específico son entonces usados en la ecuación (7) y la viscosidad del líquido determinada.

Van Velzen probó su método en 314 líquidos diferentes con casi 4500 puntos de datos, y una evaluación estadística cuidadosa fué hecha. Errores enormes fueron a menudo descubiertos para los primeros miembros de unas series homologas. Este punto es significativo debido a que, en la comparación de las viscosidades de líquidos calculadas y experimentales [Ref.1(T.9-12)], muchos de los compuestos probados son primeros miembros de series. Esto se refleja injustamente en el método de Van Velzen.

Se debe tener cuidado en seleccionar las contribuciones ANi y ABi apropiadas.

OTRAS CORRELACIONES .- Muchas otras técnicas de estimación empíricas han sido propuestas [Ref.1]. Albright y Lohrenz propusieron el parámetro de correlación ZZc, y muchos otros colaboradores han propuesto relaciones involucrando η_l , T y alguna o más siguientes: Tb, Tf, M, densidad de vapor, tensión superficial, velocidad sónica, volúmenes de Van der Waals, presión de vapor, etc. [Ref.1,8,10,11]. La mayoría de estos métodos son válidos solo a temperaturas cercanas al punto normal de ebullición.

La técnica de Andrade [Ref.2] para la estimación de viscosidades en el punto de fusión fué estudiada por Matsen y Johnson [Ref.9].

Ellos expresaron esta técnica como :

$$\eta_l = \beta \rho^{2/3} T^{1/2} M^{-1/6}$$

Donde η_l en el punto de fusión se expresa en centipoises. El valor mínimo de β fué dado como de 0.051 por Andrade, basandose en consideraciones teóricas.

Matsen y Johnson encontraron que los valores actuales fueron mucho más altos; ellos tabularon determinados valores de β para un gran número de compuestos. Había una correlación de β definida por la estructura; la simple, líquidos monoatómicos simétricos aproximandose al valor teórico pero incrementando, a menudo por ordenes de magnitud, para estructuras asimétricas complejas. Por ejemplo, los valores de β para las series de n-alcenos oscilaban entre 0.058 para metano y 2.78 para propano, a pesar de que β para la mayoría de los compuestos arriba del octano caían en el rango de 0.3 a 0.7 .

Para un número de líquidos asociados, Makhija y Stairs [Ref.1] han tabulado los parámetros de A' , B' , y T' para usar en una ecuación de la forma :

$$\log \eta_l = A' + \frac{B'}{T - T'}$$

A' , B' , y T' están dados en la Tabla 8 para 10 líquidos polares comunes.

Tabla 8 Viscosidades de Líquidos Polares. [Ref. 1]

$$\log \eta_L = A' + \frac{B'}{T - T'}$$

η_L en Centipoises
 T en Kelvins

Líquido	A'	B'	T'	% error	Rango °C
Amoniaco	-1.7520	218.76	50.701	0.76	-69 to +40
Metilamina	-1.3634	126.389	102.886	0.32	-70 to -10
1,2-Diaminopropano	-1.0755	165.754	166.751	1.10	-35 to +50
Metanol	-1.6807	354.876	48.585	2.05	-98 to +50
Agua	-1.5668	230.298	146.797	0.51	-10 to +160
Etanol	-2.4401	774.414	-15.249	2.66	-98 to +70
Glicerina	-2.8834	997.586	128.481	4.50	-42 to +30
Etilen Glicol	-1.5923	498.064	141.617	0.18	+20 to +100
n-Propanol	-2.4907	725.903	37.474	1.10	0 to +70
n-Butanol	-3.0037	1033.306	-4.3828	0.80	-51 to +100

Muchos estudios han sido dirigidos a correlacionar la viscosidad reducida de líquidos en términos de la temperatura reducida, donde la viscosidad reducida es igual a :

$$\eta_l (mE)^{-1/2} / \sigma^2$$

y la temperatura reducida es : kT / E

m es la masa de la molécula, y E y σ representan energías características y parámetros de tamaño de una ley de potencial intermolecular aplicable.

Generalmente, los resultados son aceptables solo para líquidos monoatómicos, por ejemplo, argón [Ref.1], a pesar de que las aplicaciones han sido hechas también para metales líquidos y para líquidos criogénicos (y mezclas) [Ref.1].

RECOMENDACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DE VISCOSIDADES DE LÍQUIDOS DE BAJA TEMPERATURA .- Cuatro métodos de estimación de contribución de grupo han sido discutidos. Viscosidades de líquidos calculadas son comparadas con valores experimentales para 40 líquidos diferentes (generalmente de estructura simple) [Ref.1] . Grandes errores resultan, como es ilustrado por todos los métodos. Los resultados están de cualquier manera desviados desde que el método de Van Velzen no es recomendado para los primeros miembros de series homólogas .

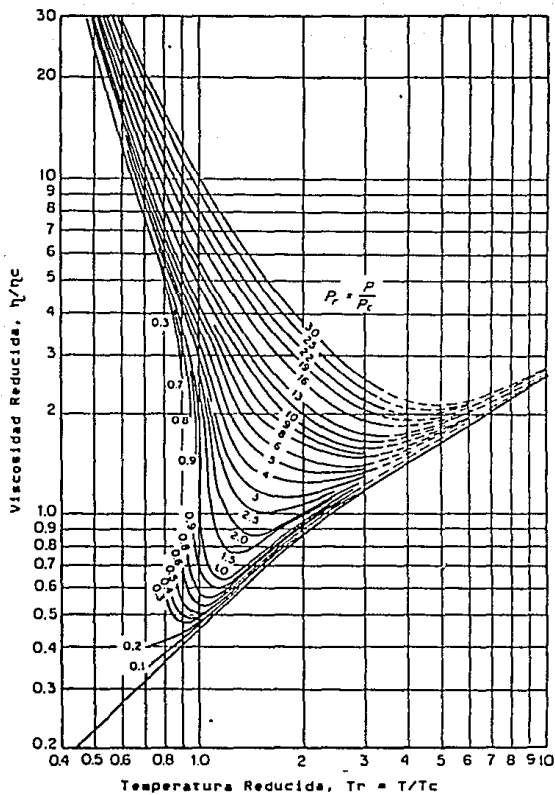


Fig. 9 Viscosidades Reducidas Generalizadas. [Ref.13]

Los métodos de Morris y Van Velzen asumen que el $\log \eta_l$ es lineal en $1/T$, mientras que los métodos de Orrick y Erbar y Thomas están ligeramente modificados para incluir la densidad del líquido. No es confiable para estructuras altamente ramificadas (Van Velzen solo puede tratar isocompuestos) o para líquidos inorgánicos, y sólo el método de Thomas puede tratar compuestos de sulfuro. Todos están limitados para un rango de temperatura de un poco arriba del punto de congelación hasta cerca de la $T_r = 0.75$.

Es recomendable que, donde sea posible, el método de Van Velzen, Cardozo, y Langenkamp sean usados para estimar las viscosidades de líquidos de baja temperatura. La excepción principal serían los primeros miembros de series homologas. Los errores varían enormemente, pero después de una prueba extensiva [Ref.12] podemos juzgar que los errores serían menores del 10 al 15% en la mayoría de los casos.

El método de Van Velzen no debería de aplicarse, se recomienda el Método de Morris o el de Orrick y Erbar. Estos Métodos, de cualquier manera, no son significativamente más exactos que el Método de Thomas.

En el apéndice A (Reid and Prausnitz, Properties of liquids and gases), valores de B y T_0 están tabulados para muchos líquidos. Estos parámetros han sido determinados de datos experimentales [Ref.1] y no estimados por el Método de VanVelzen.

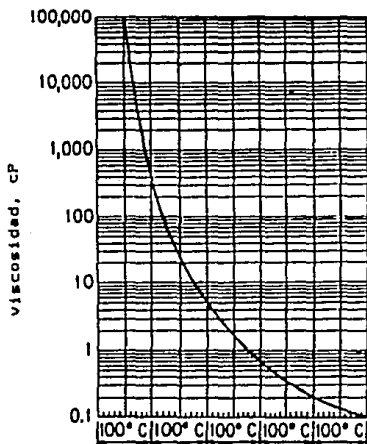


Fig. 10 Correlación de Temperatura Para la Viscosidad en Líquidos de Lewis y Squires. [Ref.1]

Obviamente, ellos deberán ser usados donde sea posible con la ecuación (7), a pesar de que el rango de aplicabilidad es aún más bajo que $Tr = 0.75$.

ESTIMACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE LIQUIDOS A ALTAS TEMPEATURAS

Para líquidos saturados a altas temperaturas, parecería ser posible usar las relaciones de los estados correspondientes desarrolladas en secciones anteriores con la condición de que los límites de la densidad no sean excedidos.

Por ejemplo, para gases no polares, Letsou y Stiel desarrollaron una correlación empleando el factor acéntrico:

$$\eta_l \xi = (\eta_l \xi)^{(0)} + w (\eta_l \xi)^{(1)} \dots (8)$$

Donde los parámetros $(\eta_l \xi)^{(0)}$ y $(\eta_l \xi)^{(1)}$ son solo funciones de la temperatura reducida. Letsou y Stiel tabularon estas funciones, pero para acercar la aproximación, de $0.76 \leq Tr \leq 0.98$ estas pueden ser expresadas como :

$$(\eta_l \xi)^{(0)} = 0.015174 - 0.02135 Tr + 0.0075 Tr^2 \dots (9)$$

$$(\eta_l \xi)^{(1)} = 0.042552 - 0.07674 Tr + 0.0340 Tr^2 \dots (10)$$

En la figura 11, $\eta_l \xi$ está graficada como una función de Tr para varios valores de w . Por encima de $Tr = 0.98$, la función $\eta_l \xi$ cae rápidamente hasta un valor alrededor de 0.00072 a 0.00078, y de $Tr = 0.98$ a 1.00, las dos ecuaciones anteriores no son aplicables. Hay que notar que el valor de $\eta_l \xi$ en el punto crítico, que es 0.00077 a 0.00079, comparado favorablemente con el valor experimental que es reportado de 0.00085, lo cual nos da un error de -8.2% .

Las ecuaciones (8), (9) y (10) representan los mejores métodos disponibles para estimar la viscosidad de líquidos saturados a temperaturas de $Tr = 0.76$ y más altas .

Han sido probados en solo 14 líquidos, la mayoría hidrocarburos, y las pruebas no han sido muy extensivas . Los autores reportan errores promedio de cerca de 3% para la mayoría de los materiales arriba de $Tr = 0.92$. Errores enormes fueron encontrados conforme se acercaban más al punto crítico .

En adición a esta correlación, Grunberg y Nissan [Ref.11] propusieron un nomograma relacionando η_l , η'_l , Tr , y pr . La gráfica de Ueyhara y Watson también muestra una región de líquido. De cualquier manera, la correlación de Letsou-Stiel es preferible a estos métodos.

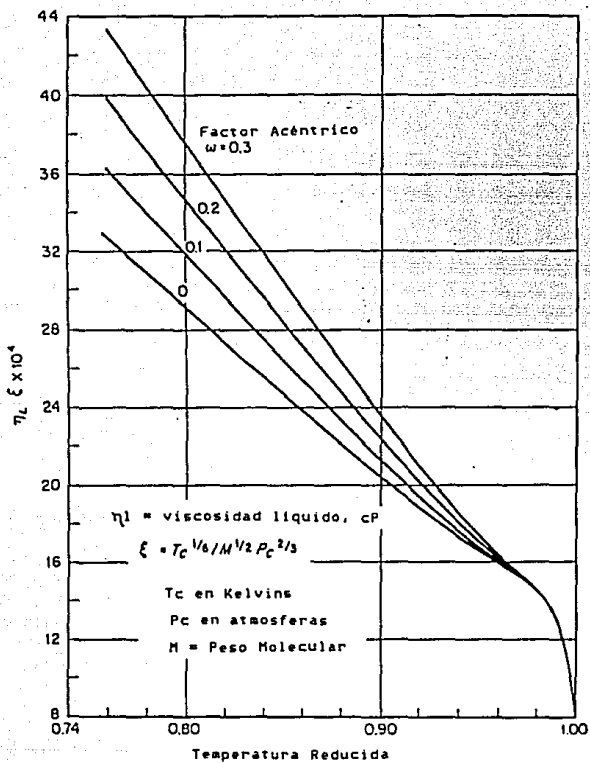


Fig. 11 Correlación de Temperatura Para la Viscosidad en Líquidos a Alta Temperatura de Letsou-Stiel. [Ref.1]

Hay un problema en seleccionar una técnica para unir temperatura baja y alta de viscosidades estimadas . A bajas temperaturas, los métodos descritos anteriormente fueron de naturaleza principalmente estructural, mientras que a altas temperaturas, en cuanto el líquido empieza a asumir algunas características de gas, los métodos requeridos son del tipo de los estados correspondientes. Es muy improbable que estimaciones separadas de viscosidades de líquidos en estas dos regiones de temperatura nos llevará a un juego en la región de conexión de $0.74 < T_r < 0.76$. Un problema particularmente fastidioso está en el hecho de que alrededor de $T_r = 0.76$, como se puede ver en la figura 11, $d\eta/dT$ es casi constante.

VISCOSIDAD DE MEZCLA DE LÍQUIDOS .

El efecto de la composición en la viscosidad de líquidos en bajas temperaturas, no pueden ser estimadas con ninguna exactitud si solo son conocidas las propiedades del componente puro. A bajas temperaturas, por ejemplo, abajo de una temperatura reducida de más o menos 0.75, la viscosidad del líquido es sensible a la estructura del líquido, que depende por supuesto, de la composición. En la figura 12 se muestra un raro caso extremo para ilustrar este punto. Un máximo en la viscosidad de la solución es a menudo notado en casos donde un componente es completamente polar o donde no puede existir alguna asociación perdida entre los materiales que constituyen la mezcla.

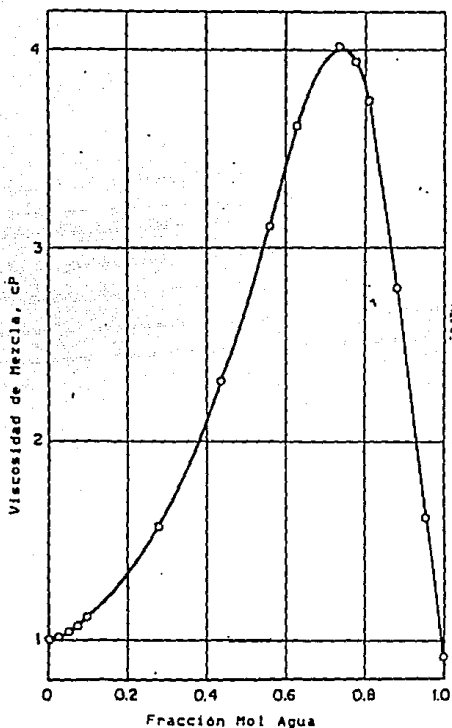


Fig. 12 Viscosidad de la Solución N,N-Dimetilacetamida - Agua
 T = 24 °C . [Ref. 1]

En este caso particular, el DMA (N,N-dimetilacetamida) no es, en general, considerada particularmente polar, mientras que el agua es fuertemente asociada. El máximo de viscosidad normalmente implantaría algún tipo de asociación DMA-agua, y Petersen ha interpretado este caso específico en términos de estructuras de resonancia involucrando la ligadura del carbonilo. Aunque hay muchas otras funciones que pueden también ser explicadas en términos de las propiedades que involucran sustancias específicas, no hay una teoría general que permita tener buenas predicciones.

Para discutir el concepto de viscosidad de mezcla de líquidos cualitativamente, debe uno formular algún diagrama del proceso molecular actual que se llevará a cabo.

En una mezcla binaria de A y B, las interacciones moleculares son en ambas del tipo A-A y B-B. También se puede agregar el tipo de interacción A-B. La introducción del tipo A-B de efectos invariables, nos lleva a indeterminar constantes de mezcla. Un buen ejemplo es el de McAllister [Ref.1], quien adoptó el planteamiento semiteórico de Eyring [Ref.1,6]. En este la interacción entre las capas de las moléculas en el gradiente de velocidad involucran saltos activados de moléculas entre las capas. Una molécula moviéndose de esta manera es tratada como si ésta estuviera teniendo una reacción química.

En este movimiento de molécula se requiere de una barrera de energía potencial (libre) ΔG^* , en el proceso. Este mecanismo descriptivo nos lleva a la siguiente ecuación:

$$V_1 = \left(\frac{\eta}{\rho} \right)_1 = \left(\frac{h N_0}{M} \right) \exp (\Delta G^* / RT)$$

$$= h N_0 / M \exp (-AS^* / R) \exp (\Delta H^* / RT)$$

ΔG^* , ΔH^* , y ΔS^* son las respectivas energía, entalpia y entropía de activación de Gibbs, en el proceso de movimiento de la molécula de una capa a otra. No hay manera, hasta el momento, de detreminar tales cantidades de energía pero un diagrama descriptivo le permite a uno postular un modelo de mezcla.

La interacción puede ser tomada como de tipo binario, o más. Generalmente, de tipo terciario, cuaternario, etc..

La ΔG^* para la interacción viscosa es asumida para ser expresada en general como :

$$\Delta G^*_{m} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 x_i x_j x_k \Delta G^*_{ijk}$$

Donde x representa la fracción mol. Además :

$$\Delta G^*_{AAB} = \Delta G^*_{ABA} = \Delta G^*_{AB}$$

$$\Delta G^*_{BBA} = \Delta G^*_{BAB} = \Delta G^*_{BA}$$

Combinando las ecuaciones anteriores y definiendo la viscosidad cinemática de mezcla ν_{AB} (y ν_{BA}) se obtiene la siguiente ecuación :

[Ecuación (11)]

$$\ln \nu_m = x_A \ln \nu_A + 3x_A x_B \ln \nu_{AB} + 3x_A x_B \ln \nu_{BA} + x_B \ln \nu_B + R'$$

Donde :

$$R' = x_B \ln \frac{M_B}{M_A} + 3x_A x_B \ln \frac{1 + 2M_B/M_A}{3} + 3x_A x_B \ln \frac{2 + M_B/M_A}{3} - \ln \frac{x_A + x_B M_B}{M_A}$$

La ecuación contiene dos parámetros indeterminados, ν_{AB} y ν_{BA} . Ellos son asumidos independientes de la composición pero varían con la temperatura.

McAllister aplicó esta ecuación a los sistemas benceno-tolueno, ciclohexano-heptano, metanol-tolueno, y acetona-agua a varias temperaturas.

El caso más no-ideal, acetona-agua mostró los errores más grandes, una desviación promedio de 6.4% y una desviación máxima de 15.8%. McAllister mostró de cualquier manera, con un análisis similar usando interacción cuaternaria, que el resultado de los tres parámetros correlacionados aún en este sistema es del 2 al 4%.

Heric y Brewer [Ref.1] probaron un gran número de correlaciones para viscosidades de líquidos, y concluyeron que el método de McAllister fué el más exacto. Además para valores del componente puro, solo dos puntos de datos de la viscosidad binaria son necesarios en cada una de las dos temperaturas diferentes para definir el rango entero de temperatura en la composición sobre el cual es aplicable, aunque obviamente si se usan más datos la correlación resultante será mejor.

Lobe [Ref.1] también probó muchas correlaciones para viscosidades de líquidos, y encontró que se obtenían mejores resultados con la siguiente expresión:

$$\nu_m = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i \nu_i \exp \left(\frac{\sum_{j=1}^n \alpha_j \beta_j}{RT} \right)}{\sum_{i=1}^n \beta_i} \quad j = 1 \dots (12)$$

Donde ν = viscosidad cinemática η/ρ , cSt ; β_j = fracción volúmen del componente j ; α_j = parámetro de viscosidad característica para j en la mezcla, cal/gmol °K.

Usar esta ecuación para un componente n de la mezcla, al menos n valores de viscosidad de mezcla deben ser conocidos para obtener todos los valores de α_j . Esta ecuación de cualquier manera, crea una relación entre ν_m y la composición, lo cual nos permite tener puntos máximos, mínimos o de inflección.

Para un sistema binario de A y B, Lobe expresó la siguiente ecuación:

$$\nu_m = \beta_A \nu_A e^{\beta_B \alpha^*B} + \beta_B \nu_B e^{\beta_A \alpha^*A} \quad \dots (13)$$

Donde $\alpha^*A = \alpha_A/RT$ y $\alpha^*B = \alpha_B/RT$, y sugirió que si A es elegido como el componente con menor viscosidad de líquido puro, y que si la viscosidad cinemática de la mezcla varía siempre de la misma forma con la composición, entonces:

$$\alpha^*A = -1.7 \ln(\nu_B/\nu_A)$$

$$\alpha^*B = 0.27 \ln(\nu_B/\nu_A) + (1.3 \ln(\nu_B/\nu_A))^{1/2} \quad \dots (14)$$

De esta manera, es posible estimar la viscosidad de mezcla de líquidos binarios, partiendo únicamente de viscosidades cinemáticas del componente puro.

La discusión de este punto ha sido aplicable para viscosidades de mezcla de líquidos a baja temperatura. Esencialmente cuando están disponibles datos no experimentales, no ha habido correlaciones propuestas para viscosidades de mezcla de líquidos a altas temperaturas ($T_r > 0.75$).

Se puede decir que en esta región, se puede emplear la técnica de los estados correspondientes donde las correlaciones que se muestran en secciones anteriores se usarían, así como la temperatura reducida, presión y el factor acéntrico de mezcla sean definidos por las reglas de mezclado.

Alternativamente, la correlación para la viscosidad residual también puede ser empleada.

RECOMENDACIONES PARA VISCOSIDADES DE MEZCLA DE LIQUIDOS .-

Para estimar la viscosidad de líquidos de una mezcla de dos componentes a bajas temperaturas, es recomendable que si hay suficientes valores de viscosidad y el valor del volúmen de mezcla es conocido, se deben de usar las ecuaciones (11) y (12).

Si no se cuenta con datos para la mezcla, hay que usar las ecuaciones (13) y (14). Los errores esperados varían enormemente para mezclas compuestas químicamente de materiales similares pero deben ser menores del 15 % .

CAPITULO II

VISCOSIMETROS .

- TIPOS DIFERENTES.
- FUNCIONAMIENTO.

Casi todo aquel que haya estudiado algo más que superficialmente el problema de la viscosidad ha ideado un instrumento para sus necesidades especiales o ha intentado salvar algunos de los inconvenientes de los diseños más antiguos. Por esta causa, es tal la multitud de tipos y formas de viscosímetros descritos en la literatura que la discusión presente ha de ser necesariamente incompleta. A continuación se estudiarán las diversas clases de viscosímetros describiendo unos cuantos de los más notables y más usados de cada tipo. Las consideraciones que se aplican a estos ejemplos son tan comunes a todos los viscosímetros dentro de cada clase que no resulta difícil asesorarse en cuanto a las cualidades de otros instrumentos no descritos en este capítulo.

Antes de entrar a discutir los viscosímetros, debe realizarse^y la importancia fundamental de la temperatura en las mediciones de la viscosidad. Los coeficientes de temperatura de la viscosidad son normalmente muy altos y en general tienden a ser más grandes en las sustancias más viscosas. Para sustancias ordinarias es preciso trabajar con un control de temperatura dentro de $\pm 0.01^\circ\text{C}$., en las mediciones que pretendan tener constantemente una precisión dentro de un error de 0.1% ; esto es: constantes dentro de 0.1% del valor verdadero. Para las mediciones en que basta con una precisión de 0.5%, es tolerable una variación de $\pm 0.05^\circ\text{C}$.

El papel predominante de la temperatura ha sido reconocido por los principales organismos mundiales de normalización, y en los métodos normalizados se han incluido especificaciones rigurosas para control de la temperatura. Para asegurar más la reproductibilidad de temperatura entre los laboratorios, se han establecido especificaciones elaboradas para los termómetros de uso en modificaciones de viscosidad.

Debe concederse atención cuidadosa al diseño de los baños de temperatura constante, particularmente en lo que se refiere a la eliminación de gradientes de temperatura en el líquido del baño. En general, no se advierte que un baño en el cual la agitación es enérgica y en el que en un punto se regula la temperatura dentro de $\pm 0.01^\circ\text{C}$., puede tener diferencias estables de temperatura en otros puntos del baño que lleguen a varias centésimas de grado. Esta situación se debe generalmente a las grandes pérdidas de calor por las paredes del baño, que se compensan con el uso de un calentador de área superficial pequeña. Se pueden remediar mejorando la calidad del aislamiento o introduciendo la mayor parte del calor de compensación de modo uniforme por las paredes del baño.

Otro factor que normalmente se pasa por alto es la necesidad de que la muestra esté en equilibrio completo con el baño de temperatura constante. Se necesita una cantidad de tiempo sorprendente para llegar al equilibrio con las muestras de viscosidad alta.

En general, un baño o un viscosímetro que se trata de mantener dentro de $\pm 0.01^\circ\text{C}$. de la temperatura deseada sufre fácilmente un choque térmico por contacto con un objeto más caliente o más frío. Al determinar viscosidades, es buena práctica no introducir otro viscosímetro, o cualquier otro objeto, en el baño que se está equilibrando y que está funcionando con un viscosímetro.

VISCOSÍMETROS DE TUBO CAPILAR

Los viscosímetros de tubo capilar son convenientes en particular para la medición de las propiedades de fluidez de líquidos que no tienen cambio de consistencia en función del tiempo, tal como el endurecimiento o el reblandecimiento en el trabajo. Normalmente se emplean para mediciones de precisión en líquidos Newtonianos en el intervalo de 0.01 a 100 poises [Ref.17]. No son convenientes para líquidos No Newtonianos por la variación en la velocidad de corte con la distancia desde las paredes del tubo; sin embargo, cuando se usan instrumentos en los cuales es posible variar la caída de presión en el capilar en un intervalo amplio, se deducen por las mediciones capilares las propiedades de fluidez de los líquidos No Newtonianos [Ref.1,10]. Como los viscosímetros de tubo capilar no son los instrumentos de elección para manejar estos sistemas, sólo se examinará aquí su aplicación a líquidos Newtonianos.

Para trabajos aproximados, en que pueden tolerarse errores moderados (alrededor de 0.5%), la ecuación de Poiseuille es una expresión adecuada para el flujo en capilares incluso muy cortos; sin embargo, para trabajo fino es necesario introducir dos términos de corrección por los efectos en los extremos del capilar. El término por el efecto mayor, llamado corrección por energía cinética, se agrega para tener en cuenta la energía necesaria para acelerar la velocidad del líquido desde el valor en el depósito de entrada hasta su velocidad media dentro del capilar. Si el flujo es uniforme y constante, se demuestra que la corrección de presión debe ser :

$$-\frac{dQ^2}{4r^3}$$

Sin embargo, las aceleraciones y la no constancia de las condiciones de flujo conducen en los instrumentos reales a desviaciones que se corrigen por inclusión de un coeficiente m . Aunque se considera que m es una constante de cada aparato, los trabajos recientes indican que es realmente una función del Número de Reynolds. La segunda corrección tiene en cuenta la resistencia viscosa que encuentra el líquido como resultado de los gradientes de velocidad en la corriente convergente que entra en el capilar .

Normalmente se expresa como un aumento hipotético de la longitud capilar, que es proporcional al radio del capilar. Con los dos términos de corrección añadidos, la ecuación completa para el flujo de un fluido por un capilar se convierte en :

$$\eta = \frac{\pi r^4 p}{8Q(1 + nr)} - \frac{m d Q}{8\pi(1 + nr)} \dots\dots\dots(15)$$

en donde n = viscosidad del líquido en poises; r = radio capilar en cm.; p = caída de presión por el tubo capilar en dinas/cm²; Q = velocidad de flujo de líquido por el tubo en cm³/seg; l = longitud del tubo capilar en cm; d = densidad del líquido; m = coeficiente de energía cinética, y n = constante llamada de "Couette", tal que nr es el aumento hipotético de la longitud capilar, necesario para tener en cuenta el rozamiento de convergencia.

VISCOSIMETROS ABSOLUTO Y NORMALIZADO .- Se considera que un viscosímetro es un instrumento absoluto si sus constantes de calibrado se obtienen exclusivamente a partir de sus dimensiones y de sus características de operación. Aunque teóricamente es posible usar cualquier viscosímetro capilar como instrumento absoluto, es extremadamente difícil obtener resultados exactos a menos que esté construido con sumo cuidado y de tal forma que permita aplicar fácilmente la ecuación de Poiseuille modificada (15).

La determinación de la viscosidad del agua a 20°C., hecha por Swindells [Ref.1], mediante su aparato es un ejemplo excelente de las mediciones absolutas que se pueden realizar con la mayor precisión posible haciendo uso de capilares. En la figura 13 se da un diagrama esquemático de su aparato. El líquido de ensayo (agua) hubo de pasar, forzado desde un inyector, por el capilar a velocidades conocidas, y la caída de presión por el tubo capilar se midió mediante un sistema de manómetro de mercurio.

Fue esencial para obtener resultados de precisión la observancia de las siguientes consideraciones: 1) Control de la temperatura dentro de un error de $\pm 0.004^\circ\text{C}$.; 2) Suministro constante y exactamente conocido del líquido por el inyector; 3) Medición exacta y sensible de la caída de presión por el capilar; 4) Mediciones extremadamente exactas de las dimensiones del capilar comprendidos factores como la elipticidad de la sección transversal; 5) Métodos especiales, experimentales y de extrapolación, para tener en cuenta las correcciones necesarias de la energía cinética y del factor "Couette".

En general, las mediciones absolutas se hacen solamente para normalizaciones especiales o para fines de investigación. Sin embargo, varios instrumentos para fines industriales se pueden clasificar como viscosímetros capilares absolutos, aunque su precisión es escasa.

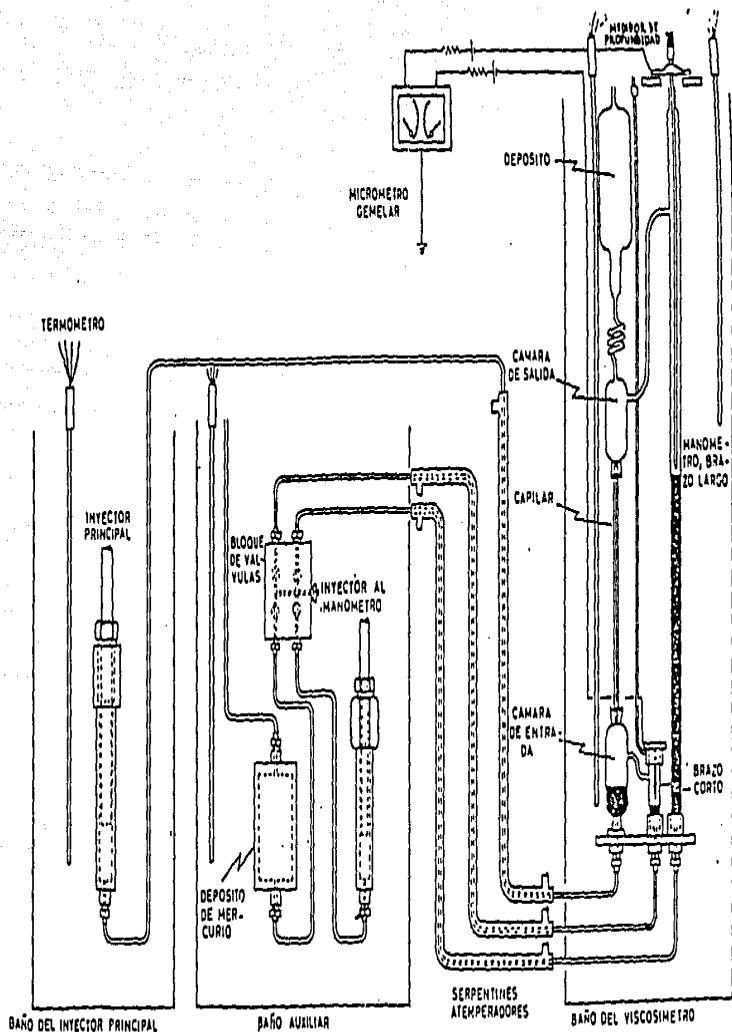


Fig. 13 Aparato del National Bureau of Standards para la medición de la viscosidad absoluta (Ref. 13)

Los instrumentos Saybolt, Engler y Redwood, que se usan extensamente para ensayo de rutina de aceites, son instrumentos de capilar corto en los cuales el calibrado primario se basa en las dimensiones especificadas de sus distintas partes. Es práctica común afinar las constantes de cada instrumento por mediciones con aceites patrones con el fin de obtener un factor de corrección de modo que la aplicación real de estos aparatos es ahora, rara vez, la de viscosímetros absolutos.

El VISCOSÍMETRO SAYBOLT, es el más representativo de los tres instrumentos. Ha sido normalizado por la A.S.T.M. en formas apropiadas para mediciones en aceites lubricantes y para el ensayo de aceites combustibles y de carretera. Esencialmente consiste en un tubo de latón que en su parte inferior lleva un capilar corto de las dimensiones precisas y montado en un baño de temperatura constante. El tubo tiene un vertedero de rebose para ajustar el nivel del líquido en la parte alta y una válvula en forma de un tapón de corcho en el fondo. Se llena el tubo con el líquido de ensayo, se le deja hasta que alcance equilibrio de temperatura, se vacía cuidadosamente el paso al vertedero, se quita el tapón del fondo y se mide el número de segundos necesarios para recoger un volumen determinado de líquido en un recipiente colocado bajo el capilar. Es normal expresar la viscosidad simplemente como Segundos Saybolt Universal o Segundos Saybolt Furol, pero se pueden convertir estos valores en centistokes por medio de tablas [Ref. 17] .

VISCOSIMETROS RELATIVOS .- Si bien es extremadamente difícil obtener constantes exactas de los viscosímetros capilares por las dimensiones y las condiciones de operación del aparato, es relativamente sencillo calibrar instrumentos capilares por normalización con líquidos de viscosidades conocidas. Para estas mediciones relativas se pueden usar aparatos relativamente sencillos. El líquido de referencia primario para calibrar los viscosímetros es el agua a 20°C. porque se prepara fácilmente en forma pura y por que se conoce su viscosidad con alto grado de exactitud. Se dispone de numerosos patrones secundarios del National Bureau of Standards y del A.P.I. ; estos líquidos proveen un medio conveniente para calibrar viscosímetros con fines de rutina.

Los viscosímetros capilares relativos entran en dos clases generales según que la presión hidrostática del líquido de ensayo provoque el flujo por el capilar o que haya de aplicarse una fuerza externa para obligar al líquido a pasar por el tubo. El primer tipo se usa más ampliamente y tiene suficiente importancia para justificar una descripción detallada de su manejo.

VISCOSIMETROS DE CAÍDA POR GRAVEDAD .- Los tubos viscosímetros actuales de caída por gravedad se derivan en general del diseño original de " OSTWALD ", del cual se representa una ligera modificación en la figura 14 (a).

Para su uso, este instrumento se invierte con la punta del tubo capilar sumergida en el líquido estudiado. Se aplica vacío al tubo de orificio ancho hasta que el menisco llega a la señal B, después de lo cual se tapa con un dedo el tubo y se pone derecho el viscosímetro.

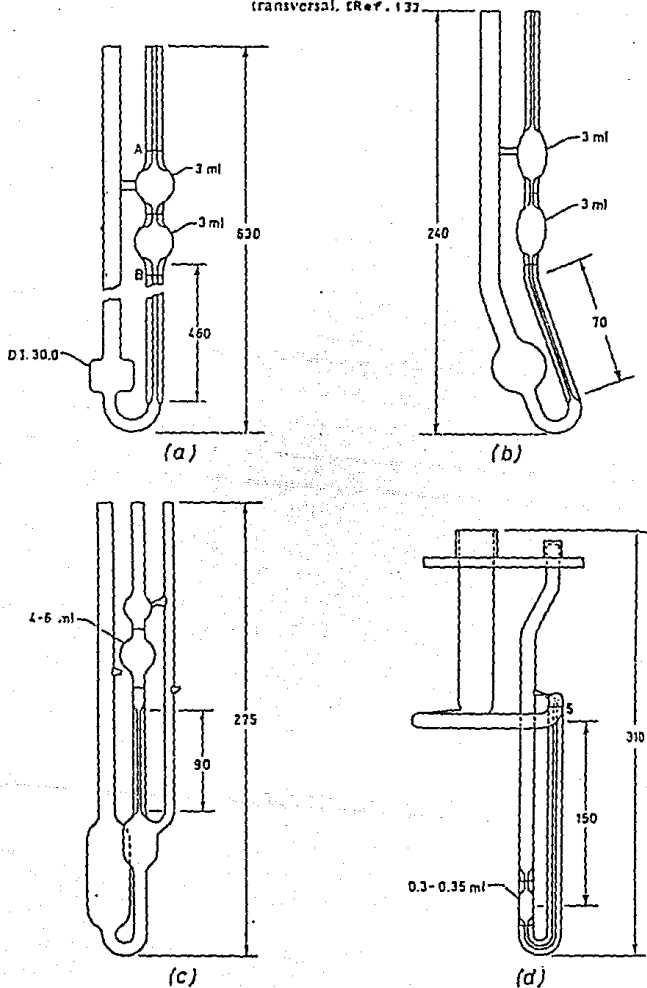
Se enjuaga el exceso de líquido del exterior, se quita el dedo y se coloca el viscosímetro en un baño de temperatura constante. Una vez alcanzado el equilibrio de temperatura, se pasa de nuevo el líquido al bulbo superior que sirve de depósito con el menisco por encima de la marca fiducial, bien aplicando vacío en el capilar o presión en el otro tubo. Finalmente, se corta el vacío, o la presión, y se mide el tiempo necesario para que el líquido fluya entre las dos marcas.

La ecuación de Poiseuille en la forma adecuada para aplicarla a este aparato, se escribe como sigue :

$$\nu = \eta / d = \frac{\pi^4 r^4 h g t}{8V(1 + nr)} - \frac{mV}{8\pi^4(1 + nr)t} \dots (16)$$

En donde $\nu = \eta/d$ es la viscosidad cinemática ; r = radio del capilar ; l = longitud del capilar ; h = altura líquida media durante la medición ; V = volumen de líquido que pasa del bulbo superior ; t = tiempo necesario para que el líquido entre las dos líneas de fe ; g = aceleración de la gravedad ; m = coeficiente de energía cinética, y n = coeficiente de la corrección de Couette.

Fig. 14 Viscosímetros capilares de vidrio típicos: a) viscosímetro patrón de Cannon; b) viscosímetro de Cannon-Fenske; c) viscosímetro de Ubbelohde; d) viscosímetro de rama transversal. (Ref. 137)



Como estos viscosímetros se calibran siempre por aplicación directa a líquidos de referencia, se puede simplificar esta ecuación como :

$$\eta = Ct - B / t \quad \dots\dots\dots (17)$$

En donde C y B son constantes del instrumento calibrado por mediciones en sustancias de viscosidad conocida. En general, se ha hallado que B / t es muy pequeño respecto al primer término y que puede despreciarse, excepto en las mediciones de sustancias con viscosidad menor que 2 centistokes. Se puede despreciar también para estas sustancias si el tiempo de flujo es mayor de 300 segundos.

El MÉTODO de CALIBRADO para el viscosímetro de Ostwald sencillo es el mismo que se usa para todos los diseños de este tipo. Por consiguiente, a continuación se describen las consideraciones necesarias para su calibrado exacto y su uso. Las ventajas y convenientes de los modelos posteriores se pueden examinar entonces en función de los diversos factores que afectan a su exactitud y precisión.

Para comodidad en el uso y en el calibrado, es aconsejable emplear una serie de viscosímetros cuyas dimensiones son tales que las constantes C en la ecuación (17) para los instrumentos sucesivos difieren por el factor 3, aproximadamente.

Por ejemplo : Una serie típica consistiría en viscosímetros cuyas constantes en centistokes sean aproximadamente 0.001, 0.003, 0.01, 0.03, 0.10, 0.30, 1.0, 3.0, y 10.0 . No es aconsejable el uso de viscosímetros capilares con constantes más bajas o más altas; los que tienen constantes más bajas son excesivamente difíciles de limpiar a causa de los capilares finos, mientras que los líquidos de viscosidades que requieren constantes más altas no se pueden manejar bien en tubos de U .

La limpieza de los tubos debe hacerse con sumo cuidado. El modo en que los fluidos de ensayo mojan las paredes y escurren durante las mediciones depende de la limpieza de la pared; además los viscosímetros con constantes bajas son particularmente sensibles al polvo o a pequeñas partículas. Es aconsejable filtrar todos los líquidos y ácidos limpiadores que se introducen en los tubos. Un buen método de limpieza consiste en lavar los tubos con disolventes para eliminar líquidos anteriores, eliminar los disolventes por lavado con alcohol o acetona, lavarlos con agua y después remojarlos en mezcla crómica. Cuando la superficie está limpia, se elimina la mezcla ácida mediante un buen lavado con agua destilada y se seca el tubo aspirando por él una corriente de aire filtrado. Se ha hallado que la superficie interna de los tubos está muchas veces alterada permanentemente cuando se ha usado para mediciones con aceites silicones. Para estos productos es aconsejable usar una serie aparte de viscosímetros calibrados especialmente para este fin.

El método primario de calibrado, " el método gradual ", requiere normalizar todos los viscosímetros con agua a 20°C. Esto sólo es posible directamente para los instrumentos más bajos de la serie; sin embargo, una vez calibrados éstos, se pueden comparar directamente con el viscosímetro próximo superior usando un líquido adecuado más viscoso. De este modo se continúa con aceites cada vez más viscosos hasta llegar a los tubos con una constante de 10 centistokes por segundo.

La constante B de la ecuación (17), probablemente no es una verdadera constante debido a la variación de μ con el número de Reynolds. Por este motivo, es aconsejable realizar el método gradual con una serie especial de viscosímetros " patrones " en los cuales la contribución del término B/t a la viscosidad es menor de 0.1%. Entonces se calibran viscosímetros de rutina por comparación directa de los patrones. Los datos respecto al diseño de un viscosímetro que sirva como patrón son extremadamente limitados. En general la contribución del término B se reduce haciendo pequeño el volumen V de flujo y aumentando la longitud; sin embargo, no ha sido establecida la mínima razón volumen -- longitud. Es bien sabido que son satisfactorios los viscosímetros con un depósito superior de 3 ml. y un capilar de 48 cm..

Para seguir el método gradual, se llenan los viscosímetros de constantes de 0.001 y 0.003 con agua destilada recién hervida y se miden los tiempos de flujo a 20°C. Se hacen las correcciones pertinentes, que se discuten más adelante, y se calculan las constantes a base de la viscosidad ya conocida del agua. Entonces se llenan los tubos de constantes aproximadas 0.003 y 0.01 con un aceite ligero, como el queroseno, que da un tiempo de flujo razonable en ambos instrumentos. Se miden y se corrigen los tiempos de flujo, y se calcula la viscosidad del aceite por el valor en el tubo de constante conocida 0.003; entonces se calcula la constante del tubo 0.01 a partir de la viscosidad hallada. Este método se continúa en toda la serie. Debe observarse que la medición con agua es la única para la cual la temperatura debe ser exactamente 20°C. Para las otras mediciones puede servir cualquier temperatura constante siempre que se hagan las correcciones oportunas.

Generalmente es incómodo usar viscosímetros patrones para mediciones de rutina. Por ello, después de calibrar los viscosímetros patrones, se calibran varias series de viscosímetros más pequeños por comparación directa con los patrones. Usando varios aceites para la comparación de cada viscosímetro de rutina, se puede evaluar la constante B, que frecuentemente es apreciable para capilares cortos.

Un segundo método de calibrado de viscosímetros de rutina consiste en usar aceites de viscosidades conocidas, que pueden solicitarse al National Bureau of Standards y al A.P.I. .

Correcciones Aplicables a los Viscosímetros Capilares de Tubo U .- Para hallar la relación entre los tiempos de flujo en un viscosímetro capilar del tipo OSTWALD y la viscosidad mediante la ecuación (16), es preciso hacer algunas correcciones.

El propio viscosímetro se usa como pipeta para la introducción de un volumen normalizado de líquido. Este volumen afecta a los niveles del líquido en el tubo U durante el ensayo y, por consiguiente, a la altura o desnivel medio. La aspiración del líquido se hace normalmente a la temperatura ambiente, que de ordinario es diferente a la temperatura de ensayo. El volumen cambia al calentarse o enfriarse a la temperatura de ensayo el líquido aspirado y es preciso tener en cuenta este cambio. Para los aceites lubricantes aspirados a 70°F. (21.1°C.) con un instrumento típico y usados a 210°F. (98.9°C.), la corrección importa aproximadamente 0.1-0.4 % del tiempo de flujo observado.

El calibrado con agua (o aceite de normalización) se hace a una temperatura sola. Cuando el viscosímetro se usa a una temperatura diferente, deben hacerse las correcciones para tener en cuenta los cambios en las dimensiones del tubo por dilatación y contracción. El orden de magnitud de la corrección es muy pequeño y se combina con la corrección para el volumen de llenado

En un viscosímetro de tubo U actúa en sentido opuesto al desnivel motriz del líquido el peso de la columna de aire en la rama opuesta. Como el peso de este aire cambia con la temperatura y la humedad, debe hacerse una corrección. La magnitud de la corrección es del orden de 0.035% del tiempo observado para los aceites cuando se vierte un aceite de densidad 0.769 a 100°F. (37.8°C.) .

En los viscosímetros de tubo U, las diferencias de diámetro del tubo en los dos lados, con diversos tiempos de flujo, conducen a una diferencia en el ascenso por capilaridad entre los dos lados. Esta diferencia se suma o se resta al desnivel del líquido, que por ello ha de corregirse. Las tensiones superficiales de los aceites que no llevan aditivos tensioactivos son casi las mismas, por lo cual se introduce muy poco error al suponer un efecto de tensión superficial constante para estos aceites.

Sin embargo, deberá concederse atención especial a los aceites que contienen diversos aditivos. El agua difiere señaladamente de los aceites, y como es el líquido de referencia primario, es esencial determinar la corrección por la diferencia de tensión superficial entre el agua y los aceites a 20°C. .

El medio mejor para llegar a la corrección es el método experimental descrito por Swindells [Ref.13]. El orden de magnitud de la corrección de tensión superficial cuando se usa un tubo calibrado con agua para una serie de aceites lubricantes es alrededor de 0.2-0.3% en un viscosímetro patrón. En instrumentos de rutina más cortos son muchas veces hasta de 0.5%.

Unas cuantas fuentes de error importantes en el uso de los viscosímetros del tipo OSTWALD, son las siguientes:

1) Fluctuaciones de temperatura. Los efectos de la temperatura han sido mencionados en el capítulo 1 de esta tesis.

2) Errores en el drenaje. Las constantes C y E de la ecuación (17) sólo son constantes sino cambia el volumen. Afortunadamente, si los tubos se usan con los métodos bien normalizados, esto es cierto.

3) Alineación vertical. Resultan cambios apreciables en el desnivel del líquido al usar el viscosímetro en posición no vertical [Ref.13].

4) Cronometraje. Para trabajos de precisión es necesario usar cronómetros fidedignos de intervalos. En la mayoría de las zonas, los conductores de la red eléctrica no son adecuados para intervalos cortos, pero si se emplean controladores de frecuencia de cristal o de diapason son convenientes los cronómetros eléctricos. Los cronómetros de segundos muertos son satisfactorios, pero deben guardarse con frecuencia.

5) Errores de Observación. Frecuentemente se introducen errores por ser irregulares o gruesas las líneas de las marcas fiduciales. Las dificultades para observar los tiempos de tránsito lentos del menisco se reducen mucho usando un pequeño telescopio enfocado sobre el tubo. Para trabajos de precisión las líneas de fe han de ser muy finas y deberán circundar el tubo en un plano perpendicular al eje del tubo. Aunque las correcciones de tensión superficial se hacen mayores a medida que se hacen más estrechos los tubos por encima y por debajo del bulbo depósito, es aconsejable que aquéllos sean de menos de 2 mm. para un bulbo de 5 ml. con el fin de alcanzar la precisión satisfactoria.

6) Cambios en la composición de la muestra. Al llenar un viscosímetro, o al obligar al líquido a pasar al depósito superior, se puede disolver en el líquido una cantidad variable de aire que causa un cambio apreciable en la viscosidad. Si el líquido es aspirado al bulbo depósito por vacío, se pueden perder las cabezas más ligeras, con lo cual se produce un aumento de viscosidad. Probablemente es preferible usar una presión cuidadosamente controlada para obligar al líquido a ascender en el tubo. Esto por lo menos asegura una cantidad de aire disuelto reproducible y aumenta la precisión.

VISCOSÍMETROS CAPILARES MODERNOS PARA MEDICIONES

RELATIVAS .- En la figura 14 se muestran ejemplos dignos de mención, de los viscosímetros más usados. Los viscosímetros de estilo patrón Cannon son excelentes para calibrados primarios. El capilar largo y el pequeño bulbo superior aseguran una corrección baja de energía cinética, mientras que el diámetro grande del depósito inferior reduce al mínimo los errores de altura debidos a cambio de volumen por efectos de la temperatura o mala regulación del volumen inicial. La gran longitud, con el consiguiente gran desnivel motriz del líquido, también se traduce en correcciones, para el efecto de la tensión superficial y otras correcciones de la altura, de menor porcentaje del que tendrían en el caso de tubos más cortos.

Los viscosímetros de rutina CANNON--FENSKE se construyen de modo que el depósito inferior quede inmediatamente debajo del superior, condición que se ha demostrado del cambio mínimo en la altura por el error en la alineación vertical del viscosímetro.

El diseño Ubbelohde fué el propuesto primero como medio de eliminar la corrección de tensión superficial. Barr [Ref.13] ha señalado la falsedad del rozamiento que respalda este medio de corrección.

Sin embargo, el instrumento tiene aún una ventaja muy grande. Al usarlo, se introduce una cantidad de líquido medida de modo aproximado y se le deja llegar al equilibrio de temperatura.

El capilar, el depósito superior y el tubo lateral se llenan entonces, aplicando presión al depósito inferior hasta que el líquido pasa de la marca fiducial superior. Cuando se quita la presión el líquido fluye rápidamente y sale por el tubo lateral grande y se vacía el depósito debajo del capilar. Entonces se mide el tiempo para que el líquido fluya del depósito superior por el capilar. Por este medio, pierde importancia el nivel inferior del líquido y no es preciso medir con exactitud el volumen de líquido que se introduce inicialmente en el instrumento. Como el líquido de ensayo se introduce con el viscosímetro en el baño, puede prescindirse de la primera corrección de temperatura mencionada antes.

Al medir la viscosidad de aceites muy oscuros, no puede observarse el menisco a través de la película de aceite que deja el líquido al escurrir, y por ello es necesario colocar el depósito fiducial en el extremo inferior del tubo y cronometrar el ascenso del menisco en el bulbo previamente deshumectado. Un instrumento ingenioso que permite efectuar este tipo de medición además de eliminar la necesidad de los ajustes de volumen exactos es el pequeño viscosímetro de "rama transversal" (vease la figura 14 [d]).

El líquido se introduce en la rama transversal hasta que el nivel quede aproximadamente en la línea 5.

Una vez alcanzado el equilibrio de temperatura en el baño, una pequeña presión lo sifona al bulbo de medición, a través del capilar. El menisco superior marcha horizontalmente en la rama transversal y por ello no cambia de altura durante el flujo. Un ajuste de volumen sólo muy aproximado asegura un desnivel motriz muy reproducible.

Un instrumento digno de mención por su método de regulación del volumen del líquido y por el hecho de ser un viscosímetro patrón en Europa es el Vogel Ossag (véase la Figura 15). El vaso interior (probeta) de este aparato se llena hasta que rebose con el líquido de ensayo, se atornilla en su sitio el conjunto de la pipeta, se aspira el líquido a la pipeta y se mide el tiempo de vaciado del bulbo.

Son de uso común viscosímetros capilares en gran número para control muy tosco o para fines de normalización. Se dispone de diversos viscosímetros del tipo de probeta similares a los instrumentos Saybolt, Engler y Redwood, pero que difieren ligeramente en las dimensiones o en la construcción.

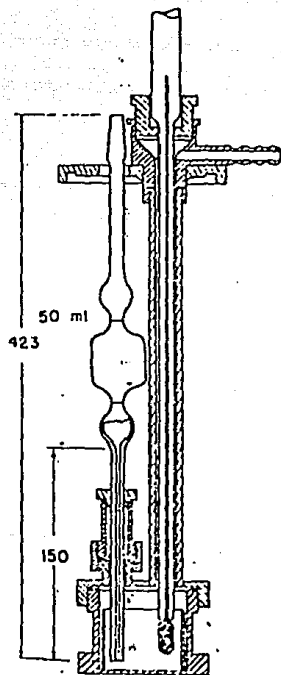


Fig. 15 Viscosímetro Vogel-Ossag
[Ref. 13]

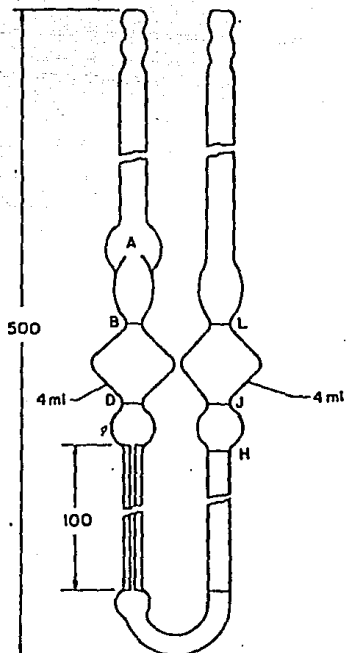


Fig. 16 Viscosímetro Bingham movi-
do por presión. [Ref. 13]

La probeta de Ford es típica de este tipo [Ref.17]; originalmente fué diseñada por la Ford Motor Company, pero luego ha sido modificada para incluir un capilar reemplazable y cierre en el fondo. Se usa mucho para el examen de pinturas, barnices y lacas.

Las pipetas sencillas son convenientes para muchas aplicaciones y se usan con ventaja en el ensayo de aceites y colas. Un instrumento típico es la pipeta Dudley, que se ha aplicado a numerosas sustancias como aceites, Dextrina y colas [Ref.15].

VISCOSIMETROS DE PRESIÓN .- En lo fundamental, los viscosímetros capilares movidos por la presión no difieren de los del tipo de caída por gravedad. La única diferencia estriba en que se usa una presión grande con respecto a la altura del líquido para obligarlo a pasar por el tubo capilar.

Las ventajas ganadas son : 1) se determina con exactitud la viscosidad absoluta sin necesidad de obtener datos exactos de la densidad; 2) Se necesitan menos conjuntos de tubos para cubrir un intervalo amplio de viscosidad, pues los intervalos de tiempo se ajustan alterando la presión aplicada; 3) Los efectos de la tensión superficial y otras correcciones de altura se pierden al aplicar presión grande.

Sus inconvenientes son : 1) Su uso es incomodo en comparación con los instrumentos sencillos de tubo en U del tipo de caída por gravedad; 2) Son difíciles de mantener las presiones de la constancia necesaria; 3) Se necesitan correcciones de drenaje porque las variaciones en la velocidad de vaciado de los bulbos de reserva son grandes e inciertas; 4) El gas disuelto puede ejercer efecto considerable sobre la velocidad del líquido.

El viscosímetro Bingham (Figura 16) es un aparato capilar típico relativo movido por presión. Se llena mediante una pipeta, y se mantiene el nivel en la rama derecha en H hasta que el líquido empieza a rebosar al vertedero en A. Se aplica por las dos ramas una diferencia de presión conocida y se mide el tiempo que tarda el líquido para fluir de B a D. Se puede invertir la presión y medir el tiempo de flujo de L a J.

VISCOSÍMETROS ROTACIONALES .

Los viscosímetros rotacionales son útiles en un amplio intervalo de viscosidades y particularmente valiosos para el estudio de sistemas NO NEWTONIANOS. Normalmente se emplean en el campo superior a 50 poises, aunque su uso es satisfactorio aún en los gases. Para trabajos de la mayor precisión (superior a 0.1%) su diseño y construcción se hacen difíciles; sin embargo, para trabajos de rutina, en los cuales su precisión es menos esencial, son sencillos y cómodos.

Los viscosímetros de CILINDROS COAXIALES consisten esencialmente en dos cilindros concéntricos separados por una fina capa anular del líquido de ensayo. Uno de los cilindros gira mientras que el otro queda estacionario, con producción de una acción de corte en el líquido. Para determinar la viscosidad se mide la torsión necesaria para producir rotación con una velocidad angular dada, o la velocidad angular resultante de una torsión dada.

Las ecuaciones fundamentales son las siguientes:

$$\text{Esfuerzo en la pared interna del cilindro} = T/2 \pi r^2 L$$

$$\text{Velocidad de corte en la pared interna del cilindro} = 2 \pi R^2 / R^2 - r^2$$

$$\gamma = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{velocidad de corte}} = \frac{T}{4 \pi L \pi} (L/r^2 - L/R^2)$$

en donde T = torsión ejercida sobre el cilindro interior;
L = longitud del cilindro interior; π = velocidad angular
relativa de los cilindros en radianes por segundo; r = radio de la
pared interna del cilindro; y R = radianes de la pared externa.

Los viscosímetros de este tipo son muy adecuados para
mediciones absolutas por la sencilla relación entre la viscosidad
y sus dimensiones y las características de operación. También se
usan mucho para mediciones relativas.

Aunque su principio es sencillo, es difícil construir un
viscosímetro de cilindros coaxiales o de Couette para mediciones
absolutas exactas y precisas. El mayor problema reside en la
eliminación de los efectos de extremo resultantes del rozamiento
sobre el fondo o la parte alta del cilindro interior. Se han
usado numerosas técnicas para este fin; Couette y otros colocaron
anillos de protección por encima y por debajo del cilindro
interno (Figura 17) .

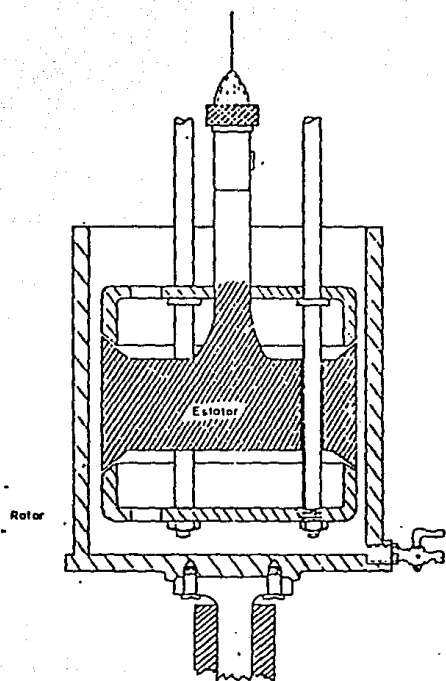


Fig. 17 Aparato de cilindros concéntricos de Couette [Ref.13]

Hooney y Ewart [Ref.13] usaron un cilindro con el extremo cónico y corrigieron matemáticamente la alteración producida por los efectos de extremo. Ford y Arabian [Ref.13] usaron en el estudio de asfaltos un instrumento que eliminaba los efectos de extremo; sin embargo su aparato no era adecuado para líquidos de viscosidad apreciablemente más baja. Gurney, Searle, Lillie y Lindsley y Fischer [Ref.13,16] variaron las longitudes del espacio anular, manteniendo el tamaño y las características de operación de la constante de los extremos, y con ello permitieron la determinación experimental de la corrección de los efectos de extremo para cada muestra.

Por las dificultades inherentes a todos los métodos de corrección, el enfoque usual es simplemente hacer el cilindro lo más largo posible para que los efectos de extremo sean pequeños. Un buen diseño, en el cual la razón entre el área de la pared del cilindro y el área de los extremos alcance un máximo, es el de Orne [Ref.13], en el que el cilindro interior gira en un espacio anular entre otros dos cilindros. Este aparato es de centrado automático y resulta adecuado para estudiar viscosidades con altas velocidades de corte. Surge otro problema a causa de la necesaria construcción metálica de los viscosímetros rotacionales de este tipo, y es el control de la temperatura. Todas las conexiones a los cilindros sino están bien protegidas son fuente de pérdidas caloríficas que originan gradientes de temperatura en los peores lugares posibles.

Se dispone de numerosos viscosímetros comerciales basados en el principio de los cilindros, pero modificados para el uso industrial de rutina. En general, estos instrumentos están ideados para mediciones relativas solamente y no se han diseñado de modo que se eliminen los efectos de extremo ni para obtener resultados de gran precisión y exactitud. El viscosímetro de MacMichael consiste en una probeta que contiene la muestra y que gira en torno de un cilindro interior sumergido en la muestra. El cilindro interior se mantiene estacionario por la fuerza de torsión en el alambre del cual está suspendido, y la torsión en el alambre mide la viscosidad del líquido. El viscosímetro Stormer aplica una torsión constante al cilindro interior y mide la velocidad de rotación. La Precision Scientific Company [Ref.13] fabrica un instrumento de diseño adelantado que registra automáticamente la torsión sobre el elemento fijo (estator) y que es adecuado en particular para sustancias de alta consistencia.

Aunque es posible analizar las condiciones de corte con más exactitud en el diseño de cilindro coaxiales, no es necesario atenerse a esta forma de aparato para las aplicaciones industriales. Se han diseñado viscosímetros rotacionales satisfactorios, en los cuales los elementos rotatorios son elipsoides, discos u otras formas; en algunos casos, el elemento rotatorio sirve a la doble finalidad de agitar la muestra y medir su viscosidad.

Un ejemplo típico es el viscosímetro de Brookfield, que usa una amplia variedad de formas, según los caracteres del líquido de ensayo. El ELECTROVISCOSÍMETRO de Fischer está equipado con bobinas de varios tamaños que se mantienen estacionarias dentro de una probeta rotatoria que contiene la muestra.

La torsión ejercida por el líquido sobre la bobina se mide con un sistema eléctrico ingenioso que permite efectuar lecturas sensibles en un amplio intervalo de viscosidad. En general, estos instrumentos sólo son para trabajo tosco y los intentos de usarlos para mediciones afinadas son generalmente equivocados.

Una clase especial de viscosímetro rotacional que tiene muchas ventajas en cuanto a precisión y sensibilidad es el VISCOSÍMETRO OSCILATORIO. En este tipo, el elemento rotatorio, que puede ser cilindro, esfera, disco o cualquiera otra forma, está montado en tal forma que puede oscilar alrededor de su eje como un péndulo de torsión. Entonces, la cantidad de amortiguamiento causada por el arrastre viscoso mide la viscosidad de la muestra. Desgraciadamente al ganar en precisión se pierde la ventaja principal de ser aplicable a los líquidos NO NEWTONIANOS, pues ya no es constante la velocidad de corte. Un viscosímetro capilar cubre generalmente el intervalo efectivo de los viscosímetros oscilatorios con más exactitud y mayor comodidad.

VISCOSIMETROS DE CAIDA DE UN CUERPO .

Los viscosímetros del tipo de caída de un cuerpo son también útiles en un intervalo de viscosidad extremadamente amplio. Sirven para medir a satisfacción viscosidades de gases y de asfaltos y alquitranes densos. En general, no son tan precisos y exactos como los capilares o los rotacionales, pero son instrumentos excelentes para el trabajo de rutina. La fuerza motriz que hace caer (o ascender) el cuerpo se basa en la diferencia de densidades entre el cuerpo y el líquido. Así es necesario determinar las densidades del líquido y del sólido con considerable precisión a fin de interpretar la velocidad de caída en función de la viscosidad. Los viscosímetros de caída de un cuerpo no permiten un análisis directo de las velocidades de corte y por ello sólo se usan para estudios empíricos de sistemas NO NEWTONIANOS. Para el estudio fundamental de los fluidos no newtonianos, se recomienda usar instrumentos rotacionales o de tubo capilar.

Teóricamente es posible usar una esfera como cuerpo que cae para mediciones absolutas, aplicando la ley de Stokes; sin embargo, es difícil obtener esferas de precisión de un tamaño adecuado para esta aplicación; además es difícil evaluar los efectos de las paredes del recipiente y del flujo turbulento. Por ello rara vez se usa el método absoluto. La velocidad de caída de una esfera se expresa por la fórmula :

$$\eta = K (d_s - d_l) t \dots\dots\dots (18)$$

En donde K = constante de proporcionalidad; d_s = densidad de la esfera; d_l = densidad del liquido; y t = tiempo de caída en un trayecto dado. Por consiguiente es posible calibrar un viscosímetro de caída de bola por un método gradual. Sin embargo, es preferible calibrar líquidos en el intervalo deseado mediante un viscosímetro absoluto del tipo de Couette y usar estos líquidos para normalizar el viscosímetro de caída de bola. Se obtiene más precisión si la esfera rueda por la pared del recipiente en vez de caer libremente por el líquido. La teoría en este caso es complicada, pero la ecuación (18) es aplicable satisfactoriamente en intervalos cortos.

Un viscosímetro muy sencillo de caída de esfera es el de uso común para ensayo de especificaciones de nitrocelulosa soluble y de acetato de celulosa [Ref.17]. Consiste en un cilindro de una pulgada de diámetro con dos marcas separadas a una distancia de 10 cm. y una bolita de acero de dimensiones cuidadosamente especificadas. Mediante un embudo de aluminio colocado en la boca del tubo se asegura que la bola caiga centralmente. Al usar el aparato, se llena el cilindro con el líquido y se estabiliza la temperatura. Entonces se deja caer por el embudo la bola en el líquido y se mide el tiempo de caída entre las dos señales.

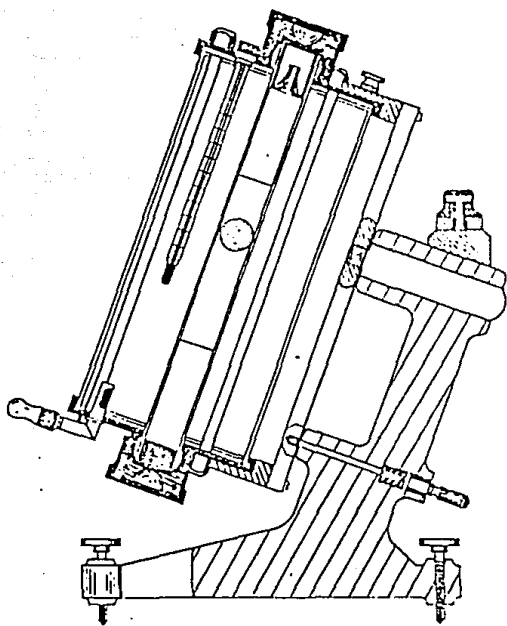


Fig. 18 Viscosímetro de Höppler (Ref. 133)

Un instrumento más preciso, usando una bola que rueda, es el viscosímetro de Hoppler [Ref.13]. Su construcción y funcionamiento se ven claramente en la figura 18. Acompañan al instrumento una serie de bolas que cubren el intervalo desde 0.01 a 25000 poises.

Otra versión del viscosímetro de caída de bola, también de Hoppler, es útil en el intervalo de viscosidad por encima de un kilopoise. Los instrumentos diseñados para uso en este intervalo se llaman CONSISTÓMETROS [Ref.13]. Un instrumento de caída de bola especial para trabajo a altas presiones fue diseñado por Weber [Ref.13]. En este aparato, el paso de la bola por las marcas fiduciales se observa mediante bobinas de inducción en torno del tubo que contiene la muestra. En muchas aplicaciones es conveniente usar como cuerpo de caída cilindros, conos y agujas, por ejemplo Bridgman, para sus famosas mediciones de viscosidad a grandes presiones, usó un viscosímetro especial de caída de cilindro [Ref.13]. Los PENETRÓMETROS, usados para determinar la consistencia de productos de gran viscosidad, como asfaltos, parafinas, ceras, grasas y otros, son también ejemplos de aparatos de esta clase.

El término consistencia incluye no solo elementos viscosos, sino también plásticos, elásticos y otros No Newtonianos. No obstante, las observaciones hechas por medio del penetrómetro pueden tener un significado sencillo en la medición de la viscosidad cuando la sustancia que se ensaya exhibe propiedades de fluidez newtoniana. Esto es cierto en el caso de muchos asfaltos refinados por vapor, para los cuales se ha establecido una relación entre la penetración observada, en décimas de milímetro, y la viscosidad absoluta, γ , en poises :

$$\gamma = 5.13 \cdot 10^9 / \text{pen}^{1.93} \dots \dots \dots (19)$$

Esta fórmula se aplica a penetraciones entre 5 y 200 .

Las agujas han sido usadas como cuerpos de caída para trabajos de precisión a altas presiones en sistema cerrado [Ref.13]. Se dejaban caer en el líquido en un tubo capilar agujas especialmente diseñadas para evitar caída irregular o vibraciones. Cuando no se podía observar directamente el paso de las agujas, se emplearon métodos electromagnéticos.

Un caso especial del principio de caída de los cuerpos, es el de la ascensión de una burbuja. Un tubo de vidrio de dimensiones normalizadas, se llena de líquido hasta una señal, a la temperatura de ensayo, y se cierra con una determinada cantidad de aire por encima de la marca.

Cuando el tubo alcanza la temperatura deseada, se invierte y se observa la velocidad de ascensión de la burbuja. Se puede calibrar la velocidad absoluta de ascensión en función de la viscosidad, pero es más común usar una serie de patrones preparados en tubos similares a la misma clase que el de la muestra. Este método se usa mucho en la industria de pinturas y barnices [Ref.13].

DIVERSOS VISCOSIMETROS .

VISCOSIMETROS DE GASES .- LA viscosimetría de gases se realiza normalmente en un instrumento capilar, como el de Rankine, representado en la figura 19 . El tubo se cierra a una presión de gas deseada y se mide el tiempo necesario para que una bolita de mercurio caiga entre las senales en el tubo más grande.

VISCOSIMETROS DE ACERCAMIENTO O DE APARTAMIENTO DE SUPERFICIES .- Cuando dos placas o superficies entre las cuales hay una capa de fluido se juntan o se separan, la velocidad de separación o acercamiento para una fuerza aplicada determinada está en relación con la viscosidad. Michell [Ref.13] usó este principio en un aparato consistente en una esfera de acero ajustada en una copa esférica con huelgo de 0.01 mm. y sujeta mediante tres pequeñas clavijas que se proyectan radialmente hacia adentro desde la copa.

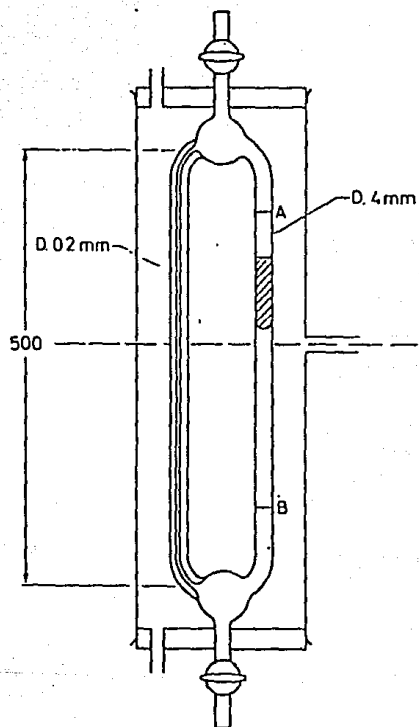


Fig. 19 Viscosímetro de Rankine para gases [Ref. 13]

Se introduce la esfera en la copa y se llena el espacio de espacio de separación con aceite. Se invierte la copa y se mide el tiempo que tarda en caer la esfera, que es proporcional a la viscosidad del aceite en poises. La ventaja principal del instrumento de Michell es la pequeña cantidad de muestra que se necesita.

Un modelo corriente descrito por Campbell y Darn [Ref.13], puede usarse con una sola gota de líquido en un amplio intervalo de viscosidades. De ordinario, los resultados tienen sólo una precisión aproximada de 1 % .

Se usa el mismo principio en los PEGAJOSIMETROS en la industria de tintas de imprenta, que actúan como un dedo mecánico [Ref.13].

INSTRUMENTOS ULTRASÓNICO Y DE DISCO VIBRATORIO .- Un viscosímetro interesante es el de Woodward [Ref.13]. Un pequeño disco vibra en su propio plano en el fluido con una frecuencia de 800 ciclos por segundo. La amplitud de la vibración, medida por la piezoelectricidad generada en bloques de titanio de bario, da indicación directa del producto de la viscosidad por la densidad. El instrumento se podría usar para el intervalo de 0.01-100 000 centipoises con una precisión de 5 % . Las principales ventajas consisten en la posibilidad de registrar de modo continuo los cambios de viscosidad en instalaciones industriales.

Un aparato similar, el ULTRAVISCOSÓN, que usa frecuencias ultrasónicas, se encuentra en el comercio [Ref.13]. Estos instrumentos no son adecuados para líquidos no Newtonianos.

INSTRUMENTOS DE GRAN VELOCIDAD DE CORTE .- Un viscosímetro de banda, ideado por Wachholtz y Asbeck [Ref.13], provee grandes velocidades de corte a la par que sencillez de construcción y operación. Se estira una banda delgada por una abertura estrecha entre dos bloques cuidadosamente pulimentados. Los bloques tienen un pequeño depósito de líquido en la parte superior y la abertura queda llena de líquido durante el ensayo. La cinta se centra automáticamente y su acción corresponde a la situación ideal en la cual dos planos separados por un grosor dado de aceite se deslizan uno frente al otro. Se mide la velocidad variando las fuerzas motrices .

El mismo aparato ha sido usado por Hull [Ref.13], quien lo encontró muy adecuado para sustancias con viscosidades de 5 a 1000 poises.

Otro viscosímetro de alta velocidad de corte, que combina el principio de centrado del viscosímetro de banda con la construcción de un viscosímetro de cilindros concéntricos, fué ideado por Asbeck, Laiderman y Van Loo [Ref.13]

Este instrumento alcanza velocidades de corte por encima de 20 000/seg sin excesivo efecto de calentamiento y fué ideado especialmente para la medición de viscosidad de pinturas en condiciones comparables a la pincelación.

INSTRUMENTOS PARA MEDICIONES DE PROPIEDADES ELÁSTICAS Y DEL COMPORTAMIENTO NO NEWTONIANO . -

Los dos adelantos dignos de mención en el diseño de instrumentos en estos últimos años son el uso de cristales de oscilación por torsión y el empleo del REOGONIÓMETRO de Weissenberg [Ref.13].

CAPITULO III

EXPERIMENTACION.

OBJETIVO .-

La experimentación tiene como finalidad establecer una práctica sobre medición de viscosidades de líquidos para los alumnos de la Escuela de Química. En base a esto se realizarán mediciones de diferentes líquidos, a diferentes temperaturas, mediante viscosímetros de Ostwald, con el propósito de seleccionar las sustancias con las que se desarrollará dicha práctica.

Las mediciones de viscosidad que llevaremos a cabo serán enfocadas a líquidos Newtonianos exclusivamente, y estas se harán mediante viscosímetros de Ostwald de diferentes calibres.

Para medir la viscosidad de un líquido mediante el viscosímetro de Ostwald se utiliza la siguiente ecuación :

$$\mu = \frac{r^4 \pi t P}{8 L V}$$

donde :

r = radio del tubo .

t = tiempo de escurrimiento

L = longitud del tubo .

P = Presión .

V = Volumen de líquido .

Para un viscosímetro dado r y L , siempre serán las mismas. Y si se define que el volumen de líquido que se introduce al viscosímetro sea siempre el mismo, (en este caso será de 6.5 ml. por consideraciones teóricas), entonces también será constante .

La presión del líquido es debida a la presión hidrostática :

$$P = h \rho g$$

Para una altura de líquido h (definida para cada viscosímetro), la presión hidrostática es constante .

Por lo tanto la viscosidad es proporcional al tiempo de escurrimiento y la presión es proporcional a la densidad, quedando la siguiente ecuación :

$$\mu = K \theta \rho$$

donde :

θ = tiempo de escurrimiento .

ρ = densidad del líquido a la temperatura de medición .

K = constante de proporcionalidad .

La cual se calcula para cualquier viscosímetro e involucra el radio del tubo, la longitud del tubo, el volumen de líquido, la altura del líquido, las constantes $\pi/8$ y la fuerza de gravedad .

$$K = \frac{r^4 \pi h g}{8 L V}$$

Como se va a trabajar con viscosímetros de Ostwald ya calibrados, es decir, que la constante de proporcionalidad K ya está definida para cada viscosímetro, únicamente tendremos que medir el tiempo de escurrimiento del líquido a temperatura constante, su densidad a dicha temperatura y, multiplicar por K para obtener la viscosidad del líquido en cP .

Para observar el comportamiento de la viscosidad al variar la temperatura, mediremos la viscosidad de cada líquido a 3 temperaturas diferentes y para obtener mejores resultados, cada medición la repetiremos dos veces .

LISTA DE EQUIPO .-

- Viscosímetros de Ostwald de diferentes calibres.
- Baño Colora con control de temperatura automático.
- Soporte Universal con pinzas de tres dedos.
- Cronómetro Digital.
- Pipeta graduada de 10 ml.
- Perilla de Succión.
- Densímetros.
- Probeta de 250 ml.

DESCRIPCION DEL EQUIPO .-

VISCOSIMETROS DE OSTWALD .- Son viscosímetros tipo Pipeta de diferentes calibres, en los cuales se introduce la muestra y se mide el tiempo que tarda en pasar de una marca a otra; este lo multiplicaremos por la constante del viscosímetro, y obtendremos la viscosidad cinemática de la muestra en centistokes. La constante del viscosímetro está definida de acuerdo al color de las marcas, en este caso se trabajará con viscosímetros de marcas rojas y los valores de las constantes se muestran en los resultados de la experimentación .

BANO COLORA .- Provisto de control de temperatura automático con el cual se calienta la muestra hasta la temperatura en que se desea llevar a cabo la medición y la mantiene constante para evitar que la viscosidad varíe con esta.

SOPORTE UNIVERSAL Y PINZAS DE TRES DEDOS .- Son utilizados para sostener el viscosímetro dentro del baño colora y mantenerlo derecho para que la muestra fluya correctamente.

CRONOMETRO .- Para tomar el tiempo de escurrimiento de la muestra de una marca a otra. Es recomendable utilizar un cronómetro digital para obtener mediciones más exactas .

PIPETA GRADUADA DE 10 ml. .- Con la cual se agrega la muestra al viscosímetro, añadiendo siempre la misma cantidad.

PERILLA DE SUCCIÓN .- Para absorber el líquido por la rama del viscosímetro hasta la marca superior .

DENSÍMETROS .- Se requieren dos densímetros: a) Para líquidos menos densos que el agua, que nos medirá la gravedad específica de la muestra, en una escala de 0.5 a 1.0 Sg.; b) Para líquidos más densos que el agua (llamado comúnmente densímetro para aguamiel), que nos medirá la densidad en grados Baumé en una escala de 0 a 50°Be .

PROBETA DE 250 ml. - La cual se llena con la muestra que se está trabajando y se introduce el densímetro dejándolo flotar hasta que quede completamente estable tomando lectura de la densidad que marca el menisco del líquido.

PROCEDIMIENTO .-

1.-) Ponga a funcionar el baño colora fijando la temperatura a la cual se quiere llevar a cabo la medición y espere a que alcance y mantenga la temperatura deseada.

2.-) Sostenga el viscosímetro con el soporte universal sujetándolo con las pinzas para que quede completamente derecho.

3.-) Limpie y seque perfectamente el viscosímetro antes de empezar a usarlo, para que al introducir la muestra se evite la mezcla con otras sustancias y se contamine.

4.-) Tome 6.5 ml. de la muestra a medir con la pipeta graduada de 10 ml. e introduzca la por la rama ancha del viscosímetro (rama izquierda) .

5.-) Sumerja el viscosímetro en el baño colora en tal forma que su nivel sobrepase en no menos de 1 cm. la altura del bulbo superior y espere unos 10 minutos para que la muestra alcance la temperatura del baño.

6.-) Asegúrese de que el viscosímetro está colocado verticalmente dentro del baño, es decir, que los centros de ambos bulbos pequeños, se hallen verticalmente encima del centro del bulbo grande.

7.-) Succione el líquido por la rama angosta (rama derecha), hasta que el nivel del líquido esté aproximadamente 0.5 cm. por encima de la marca grabada entre ambos bulbos pequeños, y cerciórese de que haya una columna continua de líquido, entre este punto y el bulbo grande. Deje fluir libremente el líquido y mida el tiempo que tarda en pasar desde la marca graduada superior hasta la inferior.

8.-) Limpie perfectamente el viscosímetro, tanto si se ha de continuar el trabajo con otros líquidos, como si se va a dejar de usar .

9.-) Para medir la densidad de la muestra a las mismas temperaturas en que se llevan a cabo las mediciones de la viscosidad, colóquela en una probeta de 250 ml. procurando que quede lo más llena posible. Sumérjala dentro del baño colora y espere unos 10 minutos para que alcance la temperatura del baño y de esta manera las mediciones de la densidad correspondan a las mediciones de viscosidad a esta temperatura. Una vez que la muestra haya alcanzado la temperatura introduzca el densímetro en la probeta, dejelo flotar libremente y tome lectura de la densidad que marque.

RESULTADOS OBTENIDOS.

VISCOSIMETRO TAMANO 25 .

RANGO DE MEDICIÓN : 0.5 A 2 cS .

CONSTANTE DEL VISCOSIMETRO : $K = 0.002$

MUESTRA: Agua

$T = 20^{\circ}\text{C}$ $\rho = 0.998 \text{ g/ml}$

$t_1 = 476.12 \text{ seg.}$ $t_2 = 479.45 \text{ seg.}$ $t_3 = 524.9 \text{ seg.}$

$\mu_1 = 0.9503 \text{ cP.}$ $\mu_2 = 0.9570 \text{ cP.}$ $\mu_3 = 1.047 \text{ cP.}$

$T = 30^{\circ}\text{C}$ $\rho = 0.9957 \text{ g/ml}$

$t_1 = 397.14 \text{ seg.}$ $t_2 = 420.66 \text{ seg.}$ $t_3 = 385.09 \text{ seg.}$

$\mu_1 = 0.7909 \text{ cP.}$ $\mu_2 = 0.8377 \text{ cP.}$ $\mu_3 = 0.7669 \text{ cP.}$

$$T = 40^{\circ}\text{C} \quad \rho = 0.9922 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 337.4 \text{ seg.} \quad t_2 = 326.8 \text{ seg.} \quad t_3 = 332.6 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 0.6695 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 0.6485 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 0.6600 \text{ cP.}$$

MUESTRA: Tetracloruro de Carbono.

$$T = 20^{\circ}\text{C} \quad \rho = 1.594 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 345.92 \text{ seg.} \quad t_2 = 318.75 \text{ seg.} \quad t_3 = 336.11 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 1.1028 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 1.0162 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 1.0715 \text{ cP.}$$

$$T = 30^{\circ}\text{C} \quad \rho = 1.574 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 250.85 \text{ seg.} \quad t_2 = 235.41 \text{ seg.} \quad t_3 = 268.36 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 0.7897 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 0.7411 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 0.8448 \text{ cP.}$$

$$T = 35^{\circ}\text{C} \quad \rho = 1.564 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 232.90 \text{ seg.} \quad t_2 = 241.07 \text{ seg.} \quad t_3 = 255.43 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 1.5256 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 1.6211 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 1.6762 \text{ cP.}$$

VISCOSIMETRO TAMANO 50

RANGO DE MEDICIÓN: DE 0.3 A 4 cS.

CONSTANTE DEL VISCOSIMETRO: $K = 0.004$

MUESTRA: Etanol 96'

$$T = 20^{\circ}\text{C} \quad \rho = 0.8113$$

$$t_1 = 470.11 \text{ seg.} \quad t_2 = 499.54 \text{ seg.} \quad t_3 = 516.52 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 1.5256 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 1.6211 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 1.6762 \text{ cP.}$$

$$T = 30^{\circ}\text{C} \quad \rho = 0.8025 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 368.92 \text{ seg.} \quad t_2 = 351.73 \text{ seg.} \quad t_3 = 382.8 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 1.1842 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 1.1291 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 1.2288 \text{ cP.}$$

$$T = 40^{\circ}\text{C} \quad \rho = 0.7936 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 313.34 \text{ seg.} \quad t_2 = 289.87 \text{ seg.} \quad t_3 = 304.46 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 0.9947 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 0.9202 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 0.9665 \text{ cP.}$$

MUESTRA: ácido Acético .

$$T = 20^{\circ}\text{C} \quad \rho = 1.0498 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 247.85 \text{ seg.} \quad t_2 = 273.61 \text{ seg.} \quad t_3 = 298.34 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 1.0408 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 1.1489 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 1.2528 \text{ cP.}$$

$$T = 30^{\circ}\text{C} \quad \rho = 1.0380 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 256.59 \text{ seg.} \quad t_2 = 240.29 \text{ seg.} \quad t_3 = 237.45 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 1.0654 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 0.9977 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 0.9859 \text{ cP.}$$

$$T = 40^{\circ}\text{C} \quad \rho = 1.0271 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 214.68 \text{ seg.} \quad t_2 = 179.15 \text{ seg.} \quad t_3 = 195.77 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 0.8820 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 0.7360 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 0.8043 \text{ cP.}$$

VISCOSIMETRO TAMANO 100 .

RANGO DEL VISCOSIMETRO: DE 3 A 15 cS.

CONSTANTE DEL VISCOSIMETRO: $K = 0.015$

MUESTRA: Hidróxido de Sodio al 50% .

$T = 60^{\circ}\text{C}$ $\rho = 1.4967 \text{ g/ml}$

$t_1 = 714.58 \text{ seg.}$ $t_2 = 696.35 \text{ seg.}$ $t_3 = 727.43 \text{ seg.}$

$\mu_1 = 16.0427 \text{ cP.}$ $\mu_2 = 15.633 \text{ cP.}$ $\mu_3 = 16.3312 \text{ cP.}$

$T = 70^{\circ}\text{C}$ $\rho = 1.4897 \text{ g/ml}$

$t_1 = 451.74 \text{ seg.}$ $t_2 = 485.67 \text{ seg.}$ $t_3 = 469.34 \text{ seg.}$

$\mu_1 = 10.0943 \text{ cP.}$ $\mu_2 = 10.8525 \text{ cP.}$ $\mu_3 = 10.4876 \text{ cP.}$

$T = 80^{\circ}\text{C}$ $\rho = 1.4827 \text{ g/ml}$

$t_1 = 295.52 \text{ seg.}$ $t_2 = 304.99 \text{ seg.}$ $t_3 = 318.16 \text{ seg.}$

$\mu_1 = 6.5725 \text{ cP.}$ $\mu_2 = 6.7831 \text{ cP.}$ $\mu_3 = 7.0760 \text{ cP.}$

MUESTRA: Etilen Glicol .

$T = 35^{\circ}\text{C}$ $\rho = 1.1035 \text{ g/ml}$

$t_1 = 870.17 \text{ seg.}$ $t_2 = 857.32 \text{ seg.}$ $t_3 = 843.31 \text{ seg.}$

$\mu_1 = 14.4030 \text{ cP.}$ $\mu_2 = 14.191 \text{ cP.}$ $\mu_3 = 13.9672 \text{ cP.}$

$T = 45^{\circ}\text{C}$ $\rho = 1.0896 \text{ g/ml}$

$t_1 = 606.87 \text{ seg.}$ $t_2 = 593.54 \text{ seg.}$ $t_3 = 615.21 \text{ seg.}$

$\mu_1 = 9.9187 \text{ cP.}$ $\mu_2 = 9.701 \text{ cP.}$ $\mu_3 = 10.055 \text{ cP.}$

T = 55°C ρ = 1.0826 g/ml

t1 = 456.94 seg. t2 = 469.8 seg. t3 = 489.12 seg.

μ1 = 7.4202 cP. μ2 = 7.6291 cP. μ3 = 7.9428 cP.

VISCOSÍMETRO TAMANO 150 .

RANGO DEL VISCOSÍMETRO: DE 7 A 35 cS.

CONSTANTE DEL VISCOSÍMETRO: K = 0.035

MUESTRA: Sacarosa al 60% .

T = 35°C ρ = 1.1363 g/ml

t1 = 605.30 seg. t2 = 623.79 seg. t3 = 592.8 seg.

μ1 = 24.073 cP. μ2 = 24.809 cP. μ3 = 23.576 cP.

T = 40°C ρ = 1.1356 g/ml

t1 = 481.29 seg. t2 = 499.56 seg. t3 = 487.73 seg.

μ1 = 19.129 cP. μ2 = 19.855 cP. μ3 = 19.3853 cP.

T = 45°C ρ = 1.1347 g/ml

t1 = 418.73 seg. t2 = 385.06 seg. t3 = 403.69 seg.

μ1 = 16.629 cP. μ2 = 15.2918 cP. μ3 = 16.032 cP.

MUESTRA: Etilen Glicol .

T = 20°C ρ = 1.114 g/ml

t1 = 534.2 seg. t2 = 509.31 seg. t3 = 555.56 seg.

μ1 = 20.828 cP. μ2 = 19.857 cP. μ3 = 21.6614 cP.

T = 30°C ρ = 1.1070 g/ml

t1 = 382.49 seg. t2 = 390.63 seg. t3 = 400.33 seg.

μ1 = 14.8196 cP. μ2 = 15.1350 cP. μ3 = 15.5109 cP.

T = 40°C ρ = 1.0930 g/ml

t1 = 249.74 seg. t2 = 286.42 seg. t3 = 265.02 seg.

μ1 = 9.5540 cP. μ2 = 10.9570 cP. μ3 = 10.1383 cP.

VISCOSIMETRO TAMANO 200 .

RANGO DEL VISCOSIMETRO: DE 20 A 100 cS.

CONSTANTE DEL VISCOSIMETRO: K = 0.1

MUESTRA: Glicerina

T = 60°C ρ = 1.23653 g/ml

t1 = 729.47 seg. t2 = 736.25 seg. t3 = 747.04 seg.

μ1 = 90.2012 cP. μ2 = 91.0395 cP. μ3 = 92.3733 cP.

T = 70°C ρ = 1.2304 g/ml

t1 = 446.04 seg. t2 = 438.21 seg. t3 = 431.01 seg.

μ1 = 54.8604 cP. μ2 = 53.9170 cP. μ3 = 53.0310 cP.

T = 80°C ρ = 1.2243 g/ml

t1 = 259.17 seg. t2 = 265.02 seg. t3 = 270.05 seg.

μ1 = 31.7290 cP. μ2 = 32.4451 cP. μ3 = 33.0607 cP.

MUESTRA: Hidróxido de Sodio al 50% .

$T = 30^{\circ}\text{C}$ $\rho = 1.5179 \text{ g/ml}$

$t_1 = 402.14 \text{ seg.}$ $t_2 = 421.18 \text{ seg.}$ $t_3 = 416.58 \text{ seg.}$

$\mu_1 = 61.040 \text{ cP.}$ $\mu_2 = 63.9250 \text{ cP.}$ $\mu_3 = 63.2330 \text{ cP.}$

$T = 35^{\circ}\text{C}$ $\rho = 1.5142 \text{ g/ml}$

$t_1 = 294.63 \text{ seg.}$ $t_2 = 310.29 \text{ seg.}$ $t_3 = 321.45 \text{ seg.}$

$\mu_1 = 44.613 \text{ cP.}$ $\mu_2 = 46.984 \text{ cP.}$ $\mu_3 = 48.673 \text{ cP.}$

$T = 40^{\circ}\text{C}$ $\rho = 1.5109 \text{ g/ml}$

$t_1 = 247.24 \text{ seg.}$ $t_2 = 231.01 \text{ seg.}$ $t_3 = 218.70 \text{ seg.}$

$\mu_1 = 37.356 \text{ cP.}$ $\mu_2 = 34.903 \text{ cP.}$ $\mu_3 = 33.0434 \text{ cP.}$

VISCOSIMETRO TAMANO 300 .

RANGO DEL VISCOSIMETRO: DE 50 A 250 cS.

CONSTANTE DEL VISCOSIMETRO: $K = 0.25$

MUESTRA: GLICERINA .

$T = 45^{\circ}\text{C}$ $\rho = 1.2457 \text{ g/ml}$

$t_1 = 733.28 \text{ seg.}$ $t_2 = 725.63 \text{ seg.}$ $t_3 = 746.55 \text{ seg.}$

$\mu_1 = 228.37 \text{ cP.}$ $\mu_2 = 225.98 \text{ cP.}$ $\mu_3 = 232.50 \text{ cP.}$

$T = 50^{\circ}\text{C}$ $\rho = 1.2427 \text{ g/ml}$

$t_1 = 496.05 \text{ seg.}$ $t_2 = 515.57 \text{ seg.}$ $t_3 = 502.97 \text{ seg.}$

$\mu_1 = 154.107 \text{ cP.}$ $\mu_2 = 160.169 \text{ cP.}$ $\mu_3 = 156.256 \text{ cP.}$

$$T = 55^{\circ}\text{C} \quad \rho = 1.2396 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 360.22 \text{ seg.} \quad t_2 = 345.84 \text{ seg.} \quad t_3 = 351.62 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 111.631 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 107.176 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 108.967 \text{ cP.}$$

MUESTRA: Hidróxido de Sodio al 50% .

$$T = 15^{\circ}\text{C} \quad \rho = 1.529 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 309.51 \text{ seg.} \quad t_2 = 316.44 \text{ seg.} \quad t_3 = 324.02 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 118.310 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 120.959 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 123.855 \text{ cP.}$$

$$T = 20^{\circ}\text{C} \quad \rho = 1.5253 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 239.47 \text{ seg.} \quad t_2 = 245.72 \text{ seg.} \quad t_3 = 264.81 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 91.316 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 93.699 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 100.980 \text{ cP.}$$

$$T = 25^{\circ}\text{C} \quad \rho = 1.5216 \text{ g/ml}$$

$$t_1 = 215.49 \text{ seg.} \quad t_2 = 196.68 \text{ seg.} \quad t_3 = 187.13 \text{ seg.}$$

$$\mu_1 = 81.9732 \text{ cP.} \quad \mu_2 = 74.817 \text{ cP.} \quad \mu_3 = 71.184 \text{ cP.}$$

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta un análisis de los resultados obtenidos en la experimentación realizada, comparando estos resultados con los reportados en la literatura.

Posteriormente se hará un análisis de las correlaciones utilizadas para el cálculo de viscosidades de líquidos, con el fin de observar cual de ellas se ajusta más a las calculadas en la experimentación.

Para cada muestra y para cada temperatura se midió el tiempo de escurrimiento tres veces, por lo que obtuvimos tres diferentes viscosidades para cada muestra. Esto se hizo con la finalidad de obtener mejores resultados, ya que si solo se hiciera una medición no podríamos estar seguros de que esta estuviera correcta, sobre todo cuando se trata de líquidos que fluyen relativamente rápido, en los que no se puede tener una apreciación exacta al momento de pasar por las marcas .

A continuación se presenta una tabla con las viscosidades obtenidas en la experimentación, comparándolas con las reportadas en la literatura y el porcentaje de error que se obtuvo en cada medición .

MUESTRA	TEMP. °C	TIEMPO seg	DENSID. g/ml	VISCOSID. (exp) cP	VISCOSID. real cP	% Error
Agua	20	493.50	0.9980	0.9850	1.0000	-1.49
	30	400.97	0.9957	0.7985	0.8118	-1.64
	40	337.40	0.9922	0.6695	0.6781	-1.26
Tetraclor. de Carbon.	20	345.92	1.5940	1.1028	1.1125	-0.87
	30	268.36	1.5740	0.8448	0.8560	-1.31
	35	255.43	1.5640	0.7990	0.8158	-2.06
Etanol 96'	20	470.11	0.8113	1.5256	1.4021	4.10
	30	351.73	0.8025	1.1291	1.0983	2.80
	40	289.87	0.7936	0.9202	0.8882	3.60
Acido acetico	20	298.34	1.0498	1.2528	1.2670	-1.12
	30	256.59	1.0380	1.0654	1.0840	-1.72
	40	214.68	1.0271	0.8820	0.9010	-2.11
Etilen Glicol	20	555.56	1.1140	21.6614	22.5100	-3.77
	30	400.33	1.1070	15.5109	15.6000	-1.83
	35	843.81	1.1035	13.9672	13.6000	2.70
	40	286.42	1.0930	10.9570	11.2000	-2.17
	45	593.54	1.0896	9.7010	9.4000	3.20
	55	456.94	1.0826	7.4202	7.1000	4.51
Hidróxido de Sodio al 50%	15	324.02	1.5290	123.8550	126.1000	-1.78
	20	264.81	1.5253	100.9804	103.4000	-2.34
	25	215.49	1.5216	81.9732	83.8000	-2.18
	30	421.14	1.5179	63.9250	64.7986	-1.35
	35	321.45	1.5142	48.6730	49.5021	-1.67
	40	247.24	1.5109	37.3560	38.1995	-2.21
	60	696.35	1.4967	15.6330	15.5204	0.73
	70	451.74	1.4897	10.0943	9.9520	1.43
Sacarosa al 60%	35	623.80	1.1363	24.8090	25.4221	-2.41
	40	499.56	1.1356	19.8550	20.3415	-2.39
	45	418.73	1.1347	16.6290	16.8840	-1.51
Glicerina	45	746.55	1.2457	232.5041	235.2200	-1.16
	50	515.57	1.2427	160.1690	161.8200	-1.02
	55	360.22	1.2396	111.6306	112.5990	-0.86
	60	747.04	1.2365	92.3733	93.5900	-1.30
	70	446.04	1.2304	54.8804	55.3918	-0.92
	80	270.05	1.2243	33.0607	33.4250	-1.09

Como podemos observar los porcentajes de error que obtuvimos de la experimentación en la medición de las viscosidades fueron relativamente bajos, y por lo tanto, bastante aceptables, comprobando de esta manera el buen funcionamiento de los viscosímetros.

Los porcentajes de error más altos fueron los del Etanol 96', que posiblemente se debieron a la facilidad que tiene este para evaporarse, y los del Etilen Glicol que posiblemente se deban a la contaminación de la solución, ya sea en la pipeta al tomar la muestra para ser agregada o en el viscosímetro por no estar perfectamente limpio.

En términos generales las soluciones con las que se trabajo fueron adecuadas para cada viscosímetro y los resultados obtenidas con estas fueron correctos.

CALCULO DE LAS CONSTANTES DE ANDRADE .-

Estas se calcularán a partir de las viscosidades obtenidas en la experimentación mediante la siguiente ecuación:

$$\mu = A e^{B/T}$$

Donde A y B son las constantes, las cuales se obtienen a partir de dos puntos para cada líquido, es decir, teniendo como datos las viscosidades del líquido a dos temperaturas, y de esta forma tenemos dos ecuaciones con dos incógnitas. Una vez obtenidas estas constantes de Andrade se pueden calcular las viscosidades del líquido a cualquier temperatura por medio de la ecuación anterior.

Enseguida se presenta la tabla con las constantes de Andrade obtenidas para cada líquido y las viscosidades calculadas mediante estas constantes, las cuales se comparan con las viscosidades reales obtenidas de la literatura.

MUESTRA	T °C	A	B	VISCOSID. ANDRADE	VISCOSID. REAL	% ERROR
Agua	20	0.00170	1863.53	0.9850	1.0000	-1.50
	30	0.00170	1863.53	0.7985	0.8118	-1.64
	40	0.00170	1863.53	0.6561	0.6781	-3.25
Tetracloro. de Carbono	20	0.00034	2366.03	1.1028	1.1125	-0.87
	30	0.00034	2366.03	0.8448	0.8560	-1.31
	35	0.00034	2366.03	0.7442	0.8158	-8.77
Etanol 96'	20	0.00017	2671.96	1.5256	1.4021	8.81
	30	0.00017	2671.96	1.1291	1.0983	2.80
	40	0.00017	2671.96	0.8519	0.8882	-4.01
ácido Acético	20	0.00924	1438.49	1.2528	1.2670	-1.12
	30	0.00924	1438.49	1.0654	1.0840	-1.72
	40	0.00924	1438.49	0.9155	0.9010	1.61
Etilen Glicol	20	0.00013	3569.88	25.2818	22.5100	12.31
	30	0.00013	3569.88	16.9112	15.8000	7.03
	35	0.00013	3569.88	13.9672	13.6000	2.70
	40	0.00013	3569.88	11.6065	11.2000	3.63
	45	0.00013	3569.88	9.7010	9.4000	3.20
	50	0.00013	3569.88	6.8893	7.1000	-2.97
Hidróxido de Sodio al 50%	15	0.00040	3641.59	125.8927	126.1000	-0.64
	20	0.00040	3641.59	100.9804	103.4000	-2.34
	25	0.00040	3641.59	81.9732	83.8000	-2.18
	30	0.00040	3641.59	67.0033	64.8000	3.40
	35	0.00040	3641.59	55.1268	49.5000	11.37
	40	0.00040	3641.59	45.6391	38.2000	19.47
	60	0.00040	3641.59	22.6917	15.5200	46.21
	70	0.00040	3641.59	16.4969	9.9520	65.76
80	0.00040	3641.59	12.2119	6.5100	87.59	
Sacarosa al 60%	35	2.18E-5	4294.81	24.8090	25.4221	-2.41
	40	2.18E-5	4294.81	19.8550	20.3415	-2.39
	45	2.18E-5	4294.81	16.0020	16.8840	-5.22
Glicerina	45	8.15E-9	7655.50	232.5000	235.2200	-1.16
	50	8.15E-9	7655.50	160.1690	161.8200	-1.02
	55	8.15E-9	7655.50	111.6011	112.5990	-0.89
	60	8.15E-9	7655.50	78.6086	93.5900	-16.01
	70	8.15E-9	7655.50	40.2148	55.3900	-27.40
	80	8.15E-9	7655.50	21.3694	33.4250	-36.07

CALCULO DE LAS VISCOSIDADES POR MEDIO DE CORRELACIONES .

Método de Orrick y Erbar .-

$$\ln(\eta) = A + B/T + \ln(\rho M)$$

MUESTRA	A	B	M	T 'k	ρ l (g/ml)	η l (cP)
Tetraclor. de Carbon.	-9.60	1254	153.84	293	1.5940	1.1996
	-9.60	1254	153.84	303	1.5740	1.0285
	-9.60	1254	153.84	308	1.5640	0.9556
Etanol 96'	-10.37	2073	44.95	293	0.8113	1.3152
	-10.37	2073	44.95	303	0.8025	1.0587
	-10.37	2073	44.95	313	0.7936	0.8414
Acido Acético	-7.64	1144	60.05	293	1.0498	1.5041
	-7.64	1144	60.05	303	1.0380	1.3074
	-7.64	1144	60.05	313	1.0271	1.1467
Etilen Glicol	-13.37	3673	62.07	293	1.1140	30.0250
	-13.37	3673	62.07	303	1.1070	19.7270
	-13.37	3673	62.07	308	1.1035	16.1522
	-13.37	3673	62.07	313	1.0930	13.2235
	-13.37	3673	62.07	318	1.0896	10.9613
	-13.37	3673	62.07	328	1.0826	7.6582
Sacarosa al 60%	-12.76	3230	212.40	308	1.1363	24.8600
	-12.76	3230	212.40	313	1.1356	21.0120
	-12.76	3230	212.40	318	1.1347	17.8504
Glicerina	-16.58	5372	92.00	318	1.2457	156.7420
	-16.58	5372	92.00	323	1.2427	120.3772
	-16.58	5372	92.00	328	1.2396	93.1887
	-16.58	5372	92.00	333	1.2365	72.6901
	-16.58	5372	92.00	343	1.2304	45.1859
	-16.58	5372	92.00	353	1.2243	28.8534

Esta correlación no se aplicó ni al Agua ni al Hidróxido de Sodio, ya que es exclusivamente para líquidos Orgánicos.

Método de Thomas .-

$$\log [B.569 (\eta_l / \rho_l^{1/2})] = B [(1 / Tr) - 1]$$

MUESTRA	B	T 'K	Tr	ρ_l (g/ml)	η_l (cP)
Agua	0.552	293	0.4527	0.9980	0.5420
	0.552	303	0.4682	0.9957	0.4933
	0.552	313	0.4837	0.9922	0.4514
Tetraclor. de Carbon.	-0.462	293	0.5266	1.5940	0.9454
	-0.462	303	0.5446	1.5740	0.8252
	-0.462	308	0.5536	1.5640	0.7734
Etanol 96'	0.624	293	0.5676	0.8113	0.3141
	0.624	303	0.5871	0.8025	0.2872
	0.624	313	0.6065	0.7936	0.2641
Acido Acético	0.693	293	0.4928	1.0498	0.6178
	0.693	303	0.5096	1.0380	0.5522
	0.693	313	0.5264	1.0271	0.4970
Etilen Glicol	0.678	293	0.4543	1.1140	0.8034
	0.678	303	0.4698	1.1070	0.7150
	0.678	308	0.4775	1.1035	0.6766
	0.678	313	0.4853	1.0930	0.6389
	0.678	318	0.4930	1.0896	0.6067
	0.678	328	0.5085	1.0826	0.5491
Glicerina	0.768	318	0.4380	1.2457	1.2595
	0.768	323	0.4449	1.2427	1.1816
	0.768	328	0.4518	1.2396	1.1107
	0.768	333	0.4587	1.2365	1.0458
	0.768	343	0.4725	1.2304	0.9322
	0.768	353	0.4862	1.2243	0.8368

La correlación de Thomas no es recomendable para alcoholes, lo cual se verá comprobado en los porcentajes de error tan altos que más adelante se mostrarán. No se aplicó al Hidróxido de Sodio ni a la Sacarosa por no tener Temperatura Crítica, ya que se descomponen a los 1300 'C y 170 'C respectivamente.

Método de Morris .-

$$\log (\eta_l / \eta^+) = J (1 / T_r - 1)$$

$$J = (0.0577 + E \text{ comps.})^{1/2}$$

MUESTRA	J	η^+	T 'K	Tr	η_l (cP)
Tetraclor. de Carbon.	0.8036	0.1480	293	0.5266	0.7810
	0.8036	0.1480	303	0.5446	0.6954
	0.8036	0.1480	308	0.5536	0.6580
Etanol 96'	1.5058	0.0819	293	0.5676	1.1492
	1.5058	0.0819	303	0.5871	0.9382
	1.5058	0.0819	313	0.6065	0.7767
Acido acético	1.0148	0.1170	293	0.4928	1.2961
	1.0148	0.1170	303	0.5096	1.1085
	1.0148	0.1170	313	0.5264	0.9576
Etilen Glicol	2.0765	0.0819	293	0.4543	25.5595
	2.0765	0.0819	303	0.4698	18.0613
	2.0765	0.0819	308	0.4775	15.3276
	2.0765	0.0819	313	0.4853	13.0491
	2.0765	0.0819	318	0.4930	11.1880
	2.0765	0.0819	328	0.5085	8.3246
Glicerina	2.5375	0.0819	318	0.4380	147.6260
	2.5375	0.0819	323	0.4449	120.0360
	2.5373	0.0819	328	0.4518	98.2216
	2.5373	0.0819	333	0.4587	80.8578
	2.5373	0.0819	343	0.4725	55.7384
	2.5373	0.0819	353	0.4862	39.3396

El Método de Morris también es, exclusivamente, para compuestos orgánicos, y como también se requiere de la Temperatura crítica, no puede ser aplicado al Agua, ni al Hidróxido de Sodio, ni a la Sacarosa.

Método de Van Velzen, Cardozo y Langekamp .-

$$\log \eta' = B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

MUESTRA	To	B	T 'K	η' (cp)
Agua	283.16	658.25	293	0.8355
	283.16	658.25	303	0.7043
	283.16	658.25	313	0.6003
Tetraclor. de Carbon.	290.84	540.15	293	0.9690
	290.84	540.15	303	0.8423
	290.84	540.15	308	0.7880
Etanol 96'	300.88	686.64	293	1.1518
	300.88	686.64	303	0.9639
	300.88	686.64	313	0.8159
ácido acético	306.21	600.94	293	1.2260
	306.21	600.94	303	1.0490
	306.21	600.94	313	0.9066
Etilen Glicol	402.41	1365.00	293	18.4774
	402.41	1365.00	303	12.9684
	402.41	1365.00	308	10.9586
	402.41	1365.00	313	9.3102
	402.41	1365.00	318	7.9504
	402.41	1365.00	328	5.8620
Glicerina	406.00	3337.10	318	188.1770
	406.00	3337.10	323	129.4550
	406.00	3337.10	328	90.0798
	406.00	3337.10	333	63.3670
	406.00	3337.10	343	32.3368
	406.00	3337.10	353	17.1428

Para este método las constantes B y To tabuladas en el Apéndice A (Reid and Prausnitz, Properties of Gases and Liquids) no han sido calculadas para el Hidróxido de Sodio ni para la Sacarosa, por lo que no es aplicable para estos compuestos.

Método de Makhija y Stairs .-

$$\log \eta_l = A' + B' / (T - T')$$

MUESTRA	A'	B'	T'	T 'K	η_l (cP)
Agua	-1.5668	230.298	146.797	293	1.0195
	-1.5668	230.298	146.797	303	0.8083
	-1.5668	230.298	146.797	313	0.6589
Etanol 96'	-2.4401	774.414	-15.249	293	1.1809
	-2.4401	774.414	-15.249	303	0.9846
	-2.4401	774.414	-15.249	313	0.8301
Etilen Glicol	-1.5923	438.064	141.617	293	20.0192
	-1.5923	438.064	141.617	303	13.2476
	-1.5923	438.064	141.617	308	10.9791
	-1.5923	438.064	141.617	313	9.1993
	-1.5923	438.064	141.617	318	7.7857
	-1.5923	438.064	141.617	328	5.7285
Glicerina	-2.8834	997.586	128.481	318	240.0923
	-2.8834	997.586	128.481	323	175.8231
	-2.8834	997.586	128.481	328	130.7841
	-2.8834	997.586	128.481	333	98.7002
	-2.8834	997.586	128.481	343	58.4708
	-2.8834	997.586	128.481	353	36.2923

Las constantes A', B', y T', solo han sido calculadas para 10 líquidos, de los cuales aparecen únicamente estos cuatro: Agua, Etanol, Etilen Glicol y Glicerina, por lo que no se pudo aplicar a los demás.

Método de LOBE .-

$$\begin{aligned} \dot{V}_m &= \phi_A \dot{V}_A e^{\phi_B \alpha^* B} + \phi_B \dot{V}_B e^{\phi_A \alpha^* A} \\ \alpha^* A &= -1.7 \ln (\dot{V}_B / \dot{V}_A) \\ \alpha^* B &= 0.27 \ln (\dot{V}_B / \dot{V}_A) + (1.3 \ln (\dot{V}_B / \dot{V}_A))^{1/2} \end{aligned}$$

MUESTRA: Etanol 96'

	T = 293'K	T = 303'K	T = 313'K
ϕ_A	0.04	0.04	0.04
\dot{V}_A	1.0000	0.8118	0.6781
ϕ_B	0.96	0.96	0.96
\dot{V}_B	1.5203	1.2742	1.0803
$\alpha^* A$	-0.7121	-0.7664	-0.7917
$\alpha^* B$	0.8511	0.8873	0.9038
\dot{V}_m (cS)	1.5091	1.2624	1.0694
\dot{V}_m (cP)	1.2243	1.0131	0.8487

En este caso solo se calcularon las viscosidades del ETANOL 96', ya que el Método de LOBE se aplica únicamente a MEZCLA de LIQUIDOS .

PARA CALCULAR LA VISCOSIDAD DE SUSPENSIONES LIQUIDO--SÓLIDO
 PODEMOS APLICAR LAS SIGUIENTES CORRELACIONES :

Método de Kunitz .-

$$\mu_m / \mu_l = (1 + 0.5 \phi_s) / (1 - \phi_s)^4$$

donde:

μ_m = Viscosidad de la mezcla, cP

μ_l = Viscosidad del líquido, cP

ϕ_s = Fracción Volumen sólidos

MUESTRA	ϕ_s	T °K	μ_l (cP)	μ_m (cP)
Hidróxido de Sodio al 50%	0.5	288	1.1573	21.8021
	0.5	293	1.0049	20.0000
	0.5	298	0.8935	18.3000
	0.5	303	0.8007	16.2360
	0.5	308	0.7225	14.8303
	0.5	313	0.6560	13.5620
	0.5	333	0.4687	10.7440
	0.5	343	0.4060	9.4080
	0.5	353	0.3565	8.3019
	Sacarosa al 60%	0.6	308	0.7225	37.6746
0.6		313	0.6560	34.4348
0.6		318	0.5986	33.8153

Método de Muri y Ototake .-

$$\mu_m / \mu_l = 1 + (1.56 \phi_s / 0.52 - \phi_s)$$

MUESTRA	ϕ_s	T 'K	μ_l (cP)	μ_m (cP)
	0.5	288	1.1573	43.6000
Hidróxido	0.5	293	1.0049	40.0000
	0.5	298	0.8935	36.6000
de Sodio	0.5	303	0.8007	32.4700
	0.5	308	0.7225	29.6760
al 50%	0.5	313	0.6560	27.1240
	0.5	333	0.4687	21.4880
	0.5	343	0.4060	18.8160
	0.5	353	0.3565	16.6040

Este método no se puede aplicar a la Sacarosa al 60% ya que es para $\phi_s \leq 0.5$.

Método de Mooney .-

$$\ln(\mu_m / \mu_l) = 2.5 \phi_s / (1 - c \phi_s)$$

$$1 < c < 1.5$$

Para $\phi_s \leq 0.5$ por lo que no se puede usar para la Sacarosa al 60%.

MUESTRA	ϕ_s	T 'K	c	μ_l (cP)	μ_m (cP)
	0.5	288	1.475	1.1573	135.3677
Hidróxido	0.5	293	1.450	1.0049	94.6648
	0.5	298	1.425	0.8935	69.0767
de Sodio	0.5	303	1.400	0.8007	51.6452
	0.5	308	1.375	0.7225	39.4472
al 50%	0.5	313	1.350	0.6560	30.7091
	0.5	333	1.250	0.4687	13.1364
	0.5	343	1.200	0.4060	9.2405
	0.5	353	1.150	0.3565	6.7514

En la siguiente tabla podremos encontrar las viscosidades obtenidas mediante cada correlación comparando cada una de ellas con las obtenidas en la experimentación y las obtenidas de la literatura .

MUESTRA	T °C	V I S C O S I D A D E S					VISCOS. (EXP.)	VISCOS. REAL	
		ORRICK	THOMAS	MORRIS	VAN VELZEN	MAKHIJA			LOBE
A G U A	20	....	0.5420	....	0.8355	1.0195	....	0.9850	1.0000
	30	....	0.4933	....	0.7043	0.8083	....	0.7985	0.8118
	40	....	0.4514	....	0.6003	0.6589	....	0.6695	0.6781
TETRA CLORURO DE C.	20	1.1996	0.9454	0.7810	0.9690	....	....	1.1028	1.1125
	30	1.0285	0.8252	0.6954	0.8423	....	....	0.8448	0.8560
	35	0.9556	0.7734	0.6580	0.7880	....	....	0.7990	0.8158
ETANOL 96'	20	1.3152	0.3141	1.1492	1.1518	1.1809	1.224	1.5256	1.4021
	30	1.0587	0.2872	0.9382	0.9639	0.9846	1.013	1.1291	1.0983
	40	0.8414	0.2641	0.7767	0.8159	0.8301	.8487	0.9202	0.8882
ACIDO ACÉTICO	20	1.5041	0.6178	1.2961	1.2260	....	....	1.2523	1.2670
	30	1.3074	0.5522	1.1085	1.0490	....	....	1.0654	1.0840
	40	1.1467	0.4970	0.9576	0.9066	....	....	0.8820	0.9010
ETILEN GLICOL	20	30.025	0.8034	25.559	18.477	20.0192	....	21.6614	22.5100
	30	19.727	0.7150	18.061	12.968	13.2476	....	15.5109	15.8000
	35	16.152	0.6766	15.327	10.958	10.971	....	13.9672	13.6000
	40	13.223	0.6389	13.049	9.3102	9.1993	....	10.9570	11.2000
	45	10.961	0.6067	11.188	7.9504	7.7857	....	9.7010	9.4000
	55	7.6592	0.5491	8.3246	5.8820	5.7285	....	7.4202	7.1000
GLICE- -RINA	45	156.70	1.2595	147.60	188.17	240.09	....	232.504	235.2200
	50	120.37	1.1816	120.03	129.45	175.82	....	160.169	161.8200
	55	93.188	1.1107	98.221	90.079	130.78	....	111.630	112.5990
	60	72.690	1.0458	80.857	63.367	98.7002	....	92.3733	93.5900
	70	45.185	0.9322	55.738	32.336	58.4708	....	54.8804	55.3918
	80	28.853	0.8368	39.339	17.142	36.2923	....	33.0607	33.4250
SACAROSA AL 60%	35	24.860	....	....	....	....	....	24.8090	25.4221
	40	21.012	....	....	....	....	....	19.8550	20.3415
	45	17.850	....	....	....	....	....	16.6290	16.8840

MUESTRA	T °C	V I S C O S I D A D E S			VISCOSID. (EXP.)	VISCOSID. REAL
		KUNITZ	MURI	MOONEY		
Hidróxido de Sodio al 50%	15	21.8021	43.6000	135.3677	123.8550	126.1000
	20	20.0000	40.0000	94.6648	100.9804	103.4000
	25	18.3000	36.6000	69.0767	81.9732	83.8000
	30	16.2360	32.4700	51.6452	63.9250	64.7986
	35	14.8303	29.6760	39.4472	48.6730	49.5021
	40	13.5620	27.1240	30.7091	37.3560	38.1995
	60	10.7440	21.4880	13.1384	15.6330	15.5204
	70	9.4080	18.8160	9.2405	10.0943	9.9520
80	8.3019	16.6040	6.7514	6.5725	6.5077	
Sacarosa al 60%	35	37.6746	.....	.....	24.8090	25.4221
	40	34.4348	.....	.....	19.8550	20.3415
	45	33.8153	.....	.....	16.6290	16.8840

Las Tablas que se muestran a continuación son una comparación de las viscosidades obtenidas en la experimentación y las obtenidas mediante las correlaciones, indicando los porcentajes de error que se tuvieron para cada líquido.

MUESTRA	T °C	VAN					
		ORRICK	THOMAS	MORRIS	VELZEN	MAKHIJA	LOBE
A G U A	20	....	-44.97	....	-10.10	3.50	....
	30	....	-38.22	....	-11.80	1.23	....
	40	....	-32.58	....	-10.34	-1.58	....
TETRACLOR. DE CARBON.	20	8.78	-14.27	-29.18	-12.13	....	....
	30	21.74	-2.32	-17.68	-0.30	....	....
	35	19.60	-3.20	-17.65	-1.38	....	....
ETANOL 96'	20	-6.20	-62.80	-24.67	-24.50	-22.59	-19.75
	30	-6.24	-74.56	-16.91	-14.63	-12.80	-10.28
	40	-5.27	-71.30	-15.59	-11.33	-9.79	-7.77
ACIDO ACETICO	20	20.06	-50.69	3.45	-2.14	....	....
	30	22.71	-48.17	4.05	-1.54	....	....
	40	30.01	-43.65	8.57	2.79	....	....
ETILEN GLICOL	20	38.61	-96.29	18.00	-14.70	-7.58	....
	30	27.18	-95.16	14.36	-16.39	-14.59	....
	35	15.64	-95.16	9.74	-21.54	-21.39	....
	40	20.69	-94.17	16.51	-15.03	-16.04	....
	45	12.99	-93.75	15.33	-18.05	-19.74	....
	55	3.21	-92.60	12.19	-20.73	-22.80	....
GLICERINA	45	-32.31	-99.46	-36.50	-19.06	3.27	....
	50	-24.84	-99.13	-25.06	-19.18	8.65	....
	55	-16.52	-98.95	-12.02	-19.31	16.15	....
	60	-12.31	-98.88	-12.47	-31.40	6.85	....
	70	-17.66	-98.32	1.56	-41.08	6.54	....
	80	-12.74	-97.50	18.99	-48.15	8.58	....
SACAROSA AL 60%	35	0.21	....	....	....	....	....
	40	3.30	....	....	....	....	....
	45	5.72	....	....	....	....	....

MUESTRA	T °C	KUNITZ	MURI	MODNEY
Hidróxido de Sodio al 50%	15	-82.40	-64.80	9.30
	20	-78.66	-57.31	-6.25
	25	-77.68	-55.35	-15.73
	30	-74.60	-49.21	-19.21
	35	-69.53	-39.03	-18.95
	40	-63.70	-27.39	-17.79
	60	-31.27	37.45	-15.96
Sacarosa al 60%	70	-6.80	86.40	-8.46
	80	26.31	152.63	2.72
	35	51.86	....	....
	40	73.43	....	....
	45	103.35	....	....

Analizando los porcentajes de error obtenidos para cada líquido, podemos concluir lo siguiente :

-- Para el AGUA la correlación que más se ajusta es la de MAKHIJA, con porcentajes de error muy aceptables. La correlación de Van Velzen no se ajusta tanto pero podría llegarse a aplicar en caso necesario sin mayores problemas.

-- En el caso del TETRACLORURO DE CARBONO, en términos generales la correlación que más se ajusta es la de VAN VELZEN y con porcentajes de error muy similares está la de THOMAS, de tal forma que cualquiera de las dos podría aplicarse obteniéndose prácticamente los mismos resultados. Analizando más detalladamente los resultados, para la Temperatura de 20 °C la correlación que más se ajusta es la de Orrick y Erbar.

-- Para el ETANOL 96' la correlación de Orrick es la que tiene los porcentajes más bajos, siendo estos aceptables. A las temperaturas de 30 y 40 'C las correlaciones de Makhija y Lobe pueden ser aplicables con resultados más o menos aceptables. La correlación de Thomas demuestra que no se debe usar para alcoholes, con los porcentajes elevadísimos que se obtuvieron en este caso.

-- El Método de VAN VELZEN es el que más se acerca para el ÁCIDO ACÉTICO, pudiéndose aplicar con la misma confiabilidad el Método de MORRIS.

-- El ETILEN GLICOL en un análisis general la que más se ajusta es la correlación de MORRIS, aunque sus porcentajes de error no son muy satisfactorios. En forma particular podemos ver que para 20 'C Makhija es la que obtiene mejores resultados, a 30 y 35 'C la de Morris, a 40 'C Van Velzen y finalmente a 40 y 45 'C el Método de Orrick es el que más se acerca. Nuevamente la correlación de Thomas demuestra con porcentajes fuera de rango que no se debe aplicar a alcoholes .

-- Para la SACAROSA se aplicaron únicamente dos correlaciones, la de Kunitz con porcentajes muy elevados, y la de ORRICK que nos da resultados muy buenos y que por lo tanto es la que más se ajusta.

-- Con la GLICERINA la que más se ajusta es la de MAKHIJA con errores hasta cierto punto aceptables. Solo para la temperatura de 70 °C Morris se acerca un poco más. Y una vez más los porcentajes de error elevadísimos del Método de Thomas confirman que no debe usarse para Alcoholes.

-- Finalmente con porcentajes de error regulares la correlación de MOONEY es la que más se ajusta para el HIDRÓXIDO DE SODIO; La de Kunitz a 70 °C se acerca más que la de Mooney pero en el intervalo de Temperatura de 15 a 40 °C sus porcentajes de error son muy elevados. El Método de Muri y Ototake prácticamente no se puede aplicar, y mucho menos a las temperaturas de 70 y 80 °C donde los errores no son aceptables.

C A P I T U L O V

PRÁCTICA PROPUESTA

MEDICIÓN DE VISCOSIDADES PARA LÍQUIDOS NEWTONIANOS .-

Para medir la viscosidad de un fluido Newtoniano se han ideado muchos métodos experimentales, con la consecuencia de haberse desarrollado una cantidad aún mayor de instrumentos de medición. Sin embargo, si se debe determinar el valor de alguna de las viscosidades (absoluta o dinámica) se requiere efectuar un análisis cuidadoso de la técnica que se pretende emplear.

Para demostrar algunos de los problemas que surgen en la viscosimetría líquida se empleará un viscosímetro, de tipo sencillo, de pipeta para medir las viscosidades de líquidos Newtonianos y luego analizar sus resultados en forma algo detallada.

Si se aplica la ley de Newton de la viscosidad, al flujo de fluidos que circulan en régimen laminar, recorriendo conductos de sección circular y uniforme, se obtiene la ley de Hagen-Poiseuille :

$$\mu = \frac{\pi P t R^4}{8 V L} \dots\dots\dots (1p)$$

expresión en la cual :

P = la presión del líquido .

V = volumen del líquido.

R = radio del tubo .

μ = la viscosidad absoluta .

L = longitud del tubo .

π = 3.14159...

t = tiempo .

Al deducir la ecuación (1p) se han efectuado diversas hipótesis que limitan su aplicación; sin embargo, se la puede emplear con el fin de determinar los valores de viscosidad de fluidos Newtonianos, si es que la construcción y operación del instrumental experimental satisfacen aquellas limitaciones.

Para este caso, se puede emplear un sencillo dispositivo experimental que permite obtener que un fluido circule con régimen laminar por el interior de un tubo largo y recto, mantenido en condiciones de temperatura constante, y que se halla equipado con un instrumento que permita medir el gradiente de presiones, en puntos del tubo ubicados a cierta distancia de sus extremos.

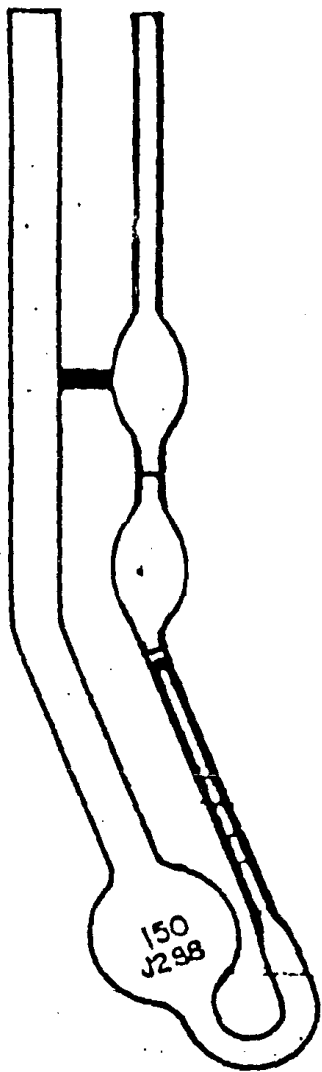
En la mayoría de los casos, cuando solamente se dispone de una pequeña muestra de líquido (situación agravada por la longitud del tubo, por la dificultad de conservar el contralor de las condiciones operativas a lo largo del conducto, y por las dificultades en la limpieza) se hace imposible, o en todo caso muy difícil, aplicar este método. Se han desarrollado otros tipos de viscosímetros, más convenientes y compactos, a los cuales también se puede aplicar la ecuación de Hagen-Poiseuille; por ejemplo, el de Cannon-Fenske, u otras modificaciones de la pipeta de Ostwald, el cual utiliza la ecuación (1p) .

Si se usara un líquido conocido se tendría :

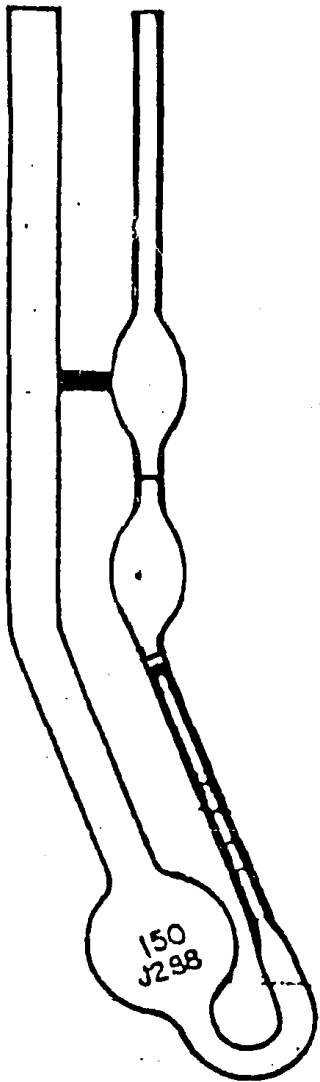
$$\mu_1 = \frac{\pi t_1 R^4 P_1}{8 V L} \dots\dots\dots (2p)$$

Repetiendo el experimento con un segundo líquido de viscosidad desconocida, se tendría :

$$\mu_2 = \frac{\pi t_2 R^4 P_2}{8 V L} \dots\dots\dots (3p)$$



150
J298



dividiendo μ_1 / μ_2 se obtiene :

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{t_1 P_1}{t_2 P_2} \quad \dots\dots (4p)$$

La presión del líquido es debida a la presión hidrostática

$$P = h \rho g \quad \dots\dots (5p)$$

Para una altura h, la presión hidrostática es constante, y por lo tanto :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad \dots\dots (6p)$$

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{t_1 P_1}{t_2 P_2} \quad \dots\dots (7p)$$

Para un viscosímetro dado, la viscosidad es proporcional al tiempo de escurrimiento y la presión es proporcional a la densidad, por lo tanto puede escribirse una ecuación de la forma siguiente :

$$\mu = k \theta \rho \quad \dots\dots (8p)$$

En donde θ es el tiempo, k la constante de proporcionalidad que ha de calcularse para cualquier viscosímetro a partir de sus dimensiones.

Una vez obtenida esta constante, el viscosímetro queda calibrado, y de esta forma se puede calcular la viscosidad de la muestra a estudiar aplicando la ecuación (8p) , simplemente midiendo el tiempo de escurrimiento y multiplicandolo por la constante del viscosímetro (para obtener la viscosidad cinemática), y multiplicando también por la densidad si se quiere obtener la viscosidad absoluta .

Si se va a trabajar con viscosímetros que no estan calibrados se puede seguir el siguiente procedimiento :

Empleando el mismo viscosímetro para los dos líquidos, el radio r, la longitud L del tubo capilar y el volumen V de la ampolla superior, serán los mismos en ambos casos en la ecuación de Poiseuille. La presión P depende de la diferencia de nivel del líquido y de su densidad, la primera es constante pero la última varía para los dos líquidos. Como la presión a la cual se produce el escurrimiento es proporcional a la densidad, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\mu_d}{\mu_a} = \frac{\rho_d t_d}{\rho_a t_a} \dots\dots (9p)$$

En la cual μ_d y μ_a son las viscosidades absolutas de la solución desconocida y del líquido de viscosidad conocida (agua) en poises, ρ_d y ρ_a las respectivas densidades, t_d y t_a los tiempos de escurrimiento.

Para obtener la viscosidad absoluta de la solución desconocida en poises, se despeja de la ecuación (9p) :

$$\mu_d = \frac{\rho_d t_d}{\rho_a t_a} \mu_a \quad \dots\dots (10p)$$

De aquí , la viscosidad relativa obtenida con el viscosímetro se multiplica por la viscosidad absoluta del líquido de viscosidad conocida .

APARATOS .-

Se debe disponer de los siguientes elementos :

- 1) viscosímetros tipo pipeta de Ostwald .
- 2) cronómetro.
- 3) baño de temperatura constante, (si es posible provisto de control automático) .
- 4) pipeta graduada de 10 ml.
- 5) solución limpiadora .

- 6) acetona .
- 7) agua destilada .
- 8) fuente de aire seco, filtrado .
- 9) soporte para mantener el viscosímetro en el baño de temperatura constante.
- 10) densímetro .
- 11) balanza analítica .
- 12) probeta graduada de 250 ml.
- 13) perilla de succión .

PROCEDIMIENTO .-

1) Ponga en funcionamiento los baños de temperatura constante y permita que alcancen y mantengan los valores, previamente determinados, para los cuales se realizarán las mediciones de viscosidad .

2) Limpie perfectamente el viscosímetro antes de emplearlo. Cuando haya que trabajar con soluciones de sustancias orgánicas enjuague con "solución limpiadora", enjuague con agua, luego con acetona, y seque con aire filtrado (para que el viscosímetro opere correctamente tendrá que estar perfectamente limpio) .

3) Conecte un trozo de tubo de goma (equipado con una pinza de Mohr) a la rama angosta del viscosímetro.

4) Coloque el viscosímetro en posición vertical; por medio de la pipeta graduada de 10 ml. introduzca en su rama ancha exactamente 6.5 ml del líquido a ensayar . (Cada vez que se introduzca una muestra de líquido en el viscosímetro lo será en condiciones de temperatura ambiente) .

5) Sumerja el viscosímetro dentro del baño de temperatura constante, en tal forma que su nivel sobrepase en no menos de 1 cm. la altura del bulbo superior. Espere unos 10 minutos para que el viscosímetro y su contenido alcancen la temperatura del baño .

6) Antes de comenzar a medir tiempos de escurrimiento, disponga verticalmente el viscosímetro dentro del baño de temperatura constante (se sabe que lo está en tal posición cuando los centros de ambos bulbos pequeños se hallan verticalmente encima del centro del bulbo grande) .

7) Mida los tiempos de escurrimiento en la siguiente forma: Aspire el líquido por el primer bulbo pequeño por sobre el capilar, succionando por el tubo de goma conectado a la rama izquierda, hasta que el nivel del líquido esté unos 0.5 cm. por encima de la marca grabada entre ambos bulbos. Cierre la pinza (en ese momento el viscosímetro debería contener una columna continua de líquido, entre el bulbo grande inferior y el punto ubicado algo más arriba de la marca grabada entre los dos bulbos pequeños). Se abre la pinza, y se registra el tiempo que el menisco de líquido tarda en pasar desde la marca graduada superior hasta la inferior .

8) Repita este procedimiento a diferentes temperaturas y por lo menos 3 veces para cada temperatura.

9) Limpie el viscosímetro en la forma ya descripta, tanto si se ha de continuar el trabajo con otros líquidos, o si de deja de efectuar ensayos .

10) Siga exactamente el mismo procedimiento para cada uno de los viscosímetros de diferente calibre que vaya a utilizar .

CUESTIONARIO PREVIO .

- 1.- ¿ Qué estudia la Reología ?
- 2.- Defina que es Viscosidad .
- 3.- ¿ Que diferencia existe entre un fluido Newtoniano y uno No-Newtoniano ?
- 4.- Cite 5 ejemplos de fluidos Newtonianos .
- 5.- ¿ Como varia la Viscosidad con la temperatura y la presión ? a) En los líquidos, b) En los gases .
- 6.- Cite 5 unidades diferentes de Viscosidad .
- 7.- Defina un Poise .
- 8.- ¿ Cual es la diferencia entre la Viscosidad absoluta y la Viscosidad Cinemática ?
- 9.- Describa los fundamentos del Viscosímetro de Ostwald.
- 10.- Exponga sobre la precisión que es necesario conservar cuando en la práctica se efectúan mediciones de tiempos.
- 11.- Defina que es un Centistoke.

- 12.- ¿Qué son los Segundos Saybolt ?
- 13.- ¿Qué números adimensionales intervienen en la viscosidad ?
- 14.- Describa gráficamente los comportamientos de :
a) Un fluido Newtoniano; b) Un fluido Plástico;
c) Un fluido Pseudoplástico.
- 15.- Explique cuál es el funcionamiento del Viscosímetro de Ostwald .
- 16.- ¿Cómo se calibra un Viscosímetro de Ostwald ?
- 17.- ¿Qué son los Grados Baumé ?
- 18.- ¿Qué es la Gravedad Específica ?
- 19.- ¿Cuál es el funcionamiento de un Densímetro ?
- 20.- ¿Cómo funciona el Baño Colora ?

INFORME POSTERIOR A LA PRACTICA

- 1.- Reporte para cada Viscosímetro una Tabla de los datos obtenidos en el experimento .
- 2.- Reporte una Tabla de los valores obtenidos de la Viscosidad para cada Viscosímetro utilizado, indicando el tipo de sustancia utilizada, y a que temperatura fue determinada .
- 3.- Convertir las Viscosidades obtenidas a Viscosidad absoluta y Viscosidad cinemática .
- 4.- Investigar las viscosidades reportadas en la literatura de las sustancias utilizadas y compararlas con los resultados obtenidos en la práctica .
- 5.- Calcular las viscosidades de estas sustancias por medio de correlaciones para obtener viscosidades de líquidos y ver cual de ellas es la que más se ajusta .

- 6.- Calcule las constantes de Andrade a partir de dos puntos para cada liquido, y una vez obtenidas calcule las viscosidades a diferentes temperaturas comparándolas con las investigadas en la literatura mediante la siguiente ecuación :

$$\mu = A e^{B/T}$$

- 7.- Discutase las simplificaciones implícitas en la determinación de viscosidades absolutas mediante la fórmula de Hagen-Poiseuille .

TABLA DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LA EXPERIMENTACIÓN.

HUESTRA	TEMP. °C	TIEMPO seg	DENSID. g/ml	CONSTANTE VISCOSIM.	VISCOSID. abs. cP	VISCOSID Cm. cS
.....
.....
.....
.....
.....

CONCLUSIONES .

Las sustancias que se recomiendan para la realización de la Práctica son las siguientes :

- Tetracloruro de Carbono a 20, 30 y 35°C, para el Viscosímetro Tamaño 25 (de 0.5 a 2 cS) .
- Acido Acético a 20, 30 y 40°C, para el Viscosímetro Tamaño 50 (de 0.8 a 4 cS) .
- Etilen Glicol a 35, 45 y 55°C, para el Viscosímetro Tamaño 100 (de 3 a 15 cS) .
- Sacarosa al 60% a 35, 40 y 45°C, para el Viscosímetro Tamaño 150 (de 7 a 35 cS) .
- Hidróxido de Sodio al 50% a 30, 35 y 40°C, para el Viscosímetro Tamaño 200 (de 20 a 100 cS) .
- Glicerina a 45, 50 y 55°C, para el Viscosímetro Tamaño 300 (de 50 a 250 cS) .

Las correlaciones para la predicción de las Viscosidades más convenientes de usar son :

- El Método de Van Velzen, Cardozo y Langekamp, para el Tetracloruro de Carbono y para el ácido Acético .

- Para el Etilen Glicol a 35°C, el Método de Morris; y a 45 y 55°C el Método de Orrick y Erbar.

- Esta correlación de Orrick también se debe usar para la Sacarosa al 60%, ya que se obtienen excelentes resultados, a pesar de tratarse de un Método aplicable únicamente a líquidos puros.

- Es posible utilizar como aproximación el Método de Mooney para el Hidróxido de Sodio al 50%, por ser la correlación que más se ajusta y con la que se obtienen mejores resultados.

- El Método de Makhija se recomienda para la Glicerina a las temperaturas de 45 y 50°C; ya que a 55°C es más recomendable utilizar el Método de Morris.

El Método de Thomas también es muy confiable para el Tetracloruro de Carbono, sobre todo a las Temperaturas de 30 y 35°C.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .

1. E.N. da C. Andrade : Endeavour, 13: 117 (1954) .
2. J.A. Barker, W. Fock, and F. Smith : Physics Fluids, 7: 897 (1964) .
3. R.S. Brokaw : Chemical Physics., 42: 1140 (1965) .
4. N.F. Carnahan, and C.J. Vadovic : Hydrocarbon Process, 49(5): 159 (1970) .
5. O. H. Clark, and M. L. Deutsch : Applied Physics, 21: 713-15 (1950) .
6. S. Glasstone, K.J. Laidler, and H. Eyring : " The Theory of Rate Processes ", McGraw-Hill, New York 1941.
7. R. C. Griffin : Technical Methods of Analysis, Mc Graw Hill, New York 1927 .
8. J. Kestin, and J. Yata : Chemical Physics, 49: 4780, (1968) .
9. R. E. Kirk, and Othmer : Enciclopedia de la Tecnología Química, 16: 110 (1961) .
10. S.I. Kreps, and M.L. Druin : Industrial Engineer Chemical Fundaments, 9: 79 (1970) .
11. C. H. Lindsley, and E. K. Fischer : Applied Physics 18: 988-96 (1947) .
12. J.M. Matsen, and E.F. Johnson : Chemical Engineer Data 5: 531 (1960) .

13. D.F. Othmer, and J.W. Conwell : Industrial Engineer
Chemical, 37: 1112 (1945) .
14. M. Prausnitz, R.C. Reid, T. Sherwood : Properties of
Gases and Liquids, Cap. 9, Mc Graw Hill, U.S.A. (1977).
15. Proc. American Society for Testing Materials (A.S.T.M.)
49: 338 (1949) .
16. A.S. Smith, and G.G. Brown : Industrial Engenner
Chemical, 35: 705 (1943) .
17. D. van Velzen, R. L. Cardozo, and H. Langenkamp :
Industrial Engeneer Chemical Fundaments, 11: 20 (1972).

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

- Considine, Douglas M., S.D. Ross
Manual de instrumentación Aplicada
C.E.C.S.A.
Mexico, 1977

- Norman Anderson
Instrumentation for Process Measurement and Control
Chilton Book Company
U.S.A., 1972

- Holman Jack Phillip
Metodos Experimentales para Ingenieros
Mc Graw-Hill
Mexico, 1977

- Robert Lang
Física Experimental
Labor S.A.
España, 1947

- Creus S. Antonio
Instrumentación Industrial
Marcombo
Mexico, 1981

- Dudley A. Pease
Basic Fluid Power
Prentice Hall Inc.
U.S.A., 1967

- E.J. Crosby
Experimentos sobre Fenómenos de Transporte en las
Operaciones Unitarias de la Industria Química
Centro Regional de Ayuda Técnica
Buenos Aires, 1968

- John M. Prausnitz, Thomas Sherwood, Robert C. Reid
Properties of Gases and Liquids
Mc Graw-Hill
U.S.A., 1977

- Robert H. Perry, C.H. Chilton
Manual del Ingeniero Químico
Mc Graw-Hill
Mexico, 1973

- Enzo Levi
Elementos de Mecánica del Medio Continuo
Limusa
Mexico, 1973

- Wilhelm H. Westphal
Practicas de Fisica
Labor S.A.
Mexico, 1965
- James W. Daily, Donald R.F. Horleman
Dinamica de los Fluidos
Trillas
Mexico, 1981
- Enzo Levi
Mecánica de los Fluidos
Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M.
Mexico, 1957
- Claudio Mataix
Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas
Harla
México, 1982
- José Cesin Farah
Importancia de la Viscosidad y su Control en las
Premezclas de Poliester reforzado con Fibra de Vidrio
Tesis Ingeniería Química (U.L.S.A.)
México, 1984

- Igor Karassik, W.C. Krutzsch, W.H. Fraser
Manual de Bombas
Mc Graw-Hill
México, 1983
- Tyler G. Hicks
Bombas su Selección y su Aplicación
C.E.C.S.A.
México, 1965
- R. Byron Bird, W.E. Stewart
Transport Phenomena
John Wiley & Son Inc.
U.S.A., 1960
- Sherwood, Pigford, Wilhe
Mass Transfer
Mc Graw-Hill
U.S.A., 1975
- Raymond E. Kirk, Donald E. Othmer
Enciclopedia de Tecnología Química
Hispano Americana
México, 1961