

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA  
ENSAYOS DE VISCOSIDAD EN LÍQUIDOS**

**JULIO CÉSAR GILL CANTILLO  
ALEXANDER TÁMARA ARIAS**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

**1999**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA  
ENSAYOS DE VISCOSIDAD EN LÍQUIDOS**

**JULIO CÉSAR GILL CANTILLO  
ALEXANDER TÁMARA ARIAS**

**Proyecto de Grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
ORLANDO CONTRERAS COTERA  
Ingeniero Mecánico**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

**1999**

Cartagena, Abril 09 de 1999

**Señores**

**COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS**  
**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**  
**L. C.**

Respetados señores:

Por medio de la presente nos permitimos entregar a ustedes para que sea puesto a consideración el estudio y aprobación del proyecto de grado que lleva por nombre: **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYOS DE VISCOSIDAD EN LÍQUIDOS**, para poder optar el título de Ingeniero Mecánico.

Agradecemos de antemano la atención prestada a la presente.

Atentamente,

**JULIO CÉSAR GILL CANTILLO**  
**C.C. No. 72.188.467 B/quilla**

**ALEXANDER TÁMARA ARIAS**  
**C.C. No. 72.187.500 B/quilla**

Cartagena, Abril 09 de 1999

**Señores**

**COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**L.**

**C.**

Respetados señores:

La presente es para manifestarle que a petición de los estudiantes **JULIO CÉSAR GILL CANTILLO Y ALEXANDER TÁMARA ARIAS**, he decidido aceptar la dirección de su proyecto de grado titulado: **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UN BANCO PARA ENSAYOS DE VISCOSIDAD EN LÍQUIDOS.**

Agradecemos de antemano la atención prestada a la presente.

Atentamente,

**ORLANDO CONTRERAS COTERA**

**C.C. No. 73.114.062 de Cartagena**

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Cartagena, 09 de Abril de 1999**

## DEDICATORIA

A Dios, a mis padres Alejandro y Carmen por su esfuerzo y dedicación; a mis hermanos Lily y Henry; y a mis tíos Juan y Rita por su colaboración y estímulo que me llevaron a lograr mi primera conquista.

**Alexander**

## DEDICATORIA

A Dios y a mis padres, Julio Antonio y Betty Isabel, sin los cuales no habría podido dejar esta huella en el largo camino de la vida; a mi hija Julisa Paola, a mi sobrino Marco Julián y a quien fuera como un hijo, Alejito; a mis hermanos: Marco Antonio, Carlos José y Julybett María; y a mi esposa Gisela Paola por la colaboración prestada para terminar este proyecto.

Por último, dedicar este trabajo a mis abuelos: Ninfidia, Manuel y Lorenzo, y en especial, a la memoria de mi mamá Chepita.

**Julio César**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Orlando Contreras Cotera, Ingeniero Mecánico y Director de la Investigación, por sus valiosas orientaciones.

Jhony Castañeda, Ingeniero Eléctrico y Jefe de Planta en la Empresa ACESCO S.A., por su asesoría en la parte eléctrica del proyecto.

Celso Santiago, Técnico en Mecánica Industrial y Jefe del Taller Santiago, por la construcción y el montaje del Banco de Pruebas.

Javier Rueda Durán, Ingeniero Mecánico y Jefe de División Técnica de la Planta de Lubricación TERPEL del Norte.



## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
INTRODUCCIÓN	
1. PRINCIPIOS BÁSICOS	4
1.1 ROZAMIENTO O FUERZA DE FRICCIÓN	4
1.1.1 Rozamiento Estático	4
1.1.2 Rozamiento Dinámico	5
1.2 FORMAS DE REDUCCIÓN DE FRICCIÓN	5
1.2.1 Acabado Superficial o Pulimento de las Superficies	5
1.2.2 Cambiando el Deslizamiento por Rodamiento	5
1.2.3 Interponiendo un Lubricante	5
1.3 DESGASTE	6
1.3.1 Tipos de Desgaste	6
1.3.1.1 El Desgaste Mecánico	6
1.3.1.2 El Desgaste Abrasivo	7
1.3.2 Formas de Reducir el Desgaste	8
1.3.2.1 Electroplástia	
1.3.2.2 Carburización	8
1.3.2.3 Nitruración	9
1.3.2.4 Revestimiento con Metal Duro	9
1.3.2.5 Pulido Electromecánico	9
1.3.2.6 Con Lubricante	9
2. LUBRICANTES	11
2.1 ORIGEN DE LOS LUBRICANTES	11
2.2 FABRICACIÓN DE ACEITES MINERALES	12
2.3 FUNCIONES DE LOS LUBRICANTES	13
2.4 CLASES DE LUBRICANTES	13

2.5 FACTORES QUE AFECTAN LA LUBRICACIÓN	15
2.6 FACTORES QUE AFECTAN LA ACCIÓN DEL LUBRICANTE	16
2.6.1 Humedad	16
2.6.2 Contaminación por materiales sólidos	16
2.6.3 Sistemas de Aplicación	19
2.6.4 Puntos de Aplicación del Lubricante	23
2.7 TIPOS DE LUBRICACIÓN	24
2.7.1 Clasificación por tipo de película lubricante	24
2.7.1.1 Características de los líquidos	25
2.7.1.2 Lubricación Hidrodinámica o de Película Fluida Completa	26
2.7.1.3 Lubricación de Película Delgada o Mixta	27
2.7.1.4 Lubricación de Película Límite	27
2.7.1.5 Lubricación Elastohidrodinámica	28
2.7.1.6 Lubricación con Materiales Sólidos	28
2.7.1.7 Lubricación por Extrema Presión	28
2.8 PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS MÁS IMPORTANTES	29
2.8.1 Viscosidad	29
2.8.2 Índice de Viscosidad	31
2.8.3 Punto de Inflamación y Llama	31
2.8.4 Gravedad Específica	31
2.8.5 Demulsibilidad	31
2.8.6 Valor de Neutralización TAN y TBN	32
2.8.7 Consistencia de las Grasas o Punto de Penetración	32
2.8.8 Punto de Goteo	32
2.8.9 Resistencia al Agua	33
2.9 NORMAS Y CLASIFICACIÓN DE LUBRICANTES INDUSTRIALES	33
2.9.1 Norma ISO para Lubricantes	33
2.9.2 Norma AGMA para Lubricantes	34
2.10 NORMAS Y CLASIFICACIÓN DE LUBRICANTES AUTOMOTRICES	37
2.10.1 Norma API para Lubricantes	37

2.10.2 Norma SAE para Lubricantes	40
2.10.3 Norma ICONTEC para Lubricantes	42
2.11 ADITIVOS	42
2.11.1 Definición de Aditivos	42
2.11.2 Propiedades Generales de los Aditivos	42
2.11.3 Tipos de Aditivos en los Aceites Lubricantes	44
2.11.4 Modificadores de las Propiedades Físicas	44
2.11.5 Modificadores de las Propiedades Químicas	44
2.11.6 Modificadores de las Propiedades Físico-Químicas	45
3. APLICACIÓN DE LOS LUBRICANTES SEGÚN SUS PROPIEDADES	47
3.1 LUBRICANTES INDUSTRIALES	47
3.1.1 Máquinas Herramientas	47
3.1.2 Reductores y Engranajes Industriales	48
3.1.3 Cojinetes	48
3.1.4 Equipos Hidráulicos	48
3.1.5 Compresores	48
3.1.6 Turbinas	49
3.2 LUBRICANTES PARA AUTOMACIÓN	49
3.2.1 Motores Diesel o a Gasolina	49
3.2.2 Grandes Motores Diesel	49
4. LA VISCOSIDAD Y SU CÁLCULO	51
4.1 VISCOSIDAD EN LÍQUIDOS Y GASES	51
4.1.1 Viscosidad en gases	51
4.1.2 Viscosidad en líquidos	51
4.2 FACTORES QUE AFECTAN LA VISCOSIDAD	56
4.2.1 Temperatura	56
4.2.2 Velocidad	56
4.2.3 Carga	57
4.2.4 Polvo y Suciedad	58
4.2.5 Agua	59

4.2.6	Solventes	59
4.3	RELACIÓN ENTRE LA VISCOSIDAD Y LA TEMPERATURA	60
4.4	DEFINICIÓN DE VISCOSÍMETRO	61
4.5	TIPOS DE VISCOSÍMETRO	63
4.5.1	Viscosímetro de Cilindros Concéntricos	64
4.5.2	Viscosímetro Saybolt	64
4.5.3	Viscosímetro Redwood	65
4.5.4	Viscosímetro Engler	65
4.5.5	Viscosímetro Ostwald	66
4.6	CONVERSIÓN DE LAS UNIDADES DE LA VISCOSIDAD	67
5.	DISEÑO DEL VISCOSÍMETRO DE CILINDROS CONCÉNTRICOS	69
5.1	GENERALIDADES	69
5.2	PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO	70
5.3	ECUACIONES PARA LA EVALUACIÓN DEL PAR DE FROTAMIENTO	71
5.4	SELECCIÓN DEL ALAMBRE DE TORSIÓN	74
5.5	DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DEL MOTOR	74
5.6	VOLUMEN DEL FLUIDO EN PRUEBA	77
5.7	RESISTENCIA ELÉCTRICA	78
6.	COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO Y SU SELECCIÓN	88
6.1	MECÁNICOS	88
6.1.1	Cilindro interno	88
6.1.2	Cilindro Externo	89
6.1.3	Alambres de Torsión	89
6.2	ELÉCTRICOS	90
6.2.1	Motor Eléctrico	90
6.2.2	Resistencia Eléctrica	90
6.2.3	Regulador de Velocidad	91
6.2.4	Pirómetro	91
6.2.5	Termocupla	91
6.2.6	Contactador	92

6.2.7 Cables	92
7. MONTAJE, CALIBRACIÓN Y OPERACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYOS DE VISCOSIDAD EN LÍQUIDOS	93
7.1 MONTAJE DEL BANCO DE PRUEBAS	93
7.2 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	94
7.2.1 Método de los Cuadrados Mínimos	97
7.3 OPERACIÓN DEL EQUIPO	98
8. CÁLCULOS PARA HALLAR LA VISCOSIDAD	101
8.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	108
8.2 COSTOS	109
9. CONCLUSIONES	111
BIBLIOGRAFÍA	113
ANEXOS	

**LISTA DE CUADROS**

	pag.
Cuadro 1. Clasificación de los lubricantes según su naturaleza.	12
Cuadro 2. Tipo de petróleo crudo.	13
Cuadro 3. Clasificación ISO para aceites industriales.	34
Cuadro 4. Clasificación AGMA para lubricantes.	35
Cuadro 5. Especificaciones AGMA de aceites R&O para engranajes Industriales.	36
Cuadro 6. Especificaciones AGMA de aceites de Extrema Presión para Engranajes.	36
Cuadro 7. Clasificación API de aceites para motores a gasolina.	38
Cuadro 8. Clasificación API de aceites para motores Diesel.	39
Cuadro 9. Clasificación API de aceites para engranajes de automotores.	40
Cuadro 10. Clasificación SAE de aceites para motores de combustión Interna.	41
Cuadro 11. Clasificación SAE de aceites para engranajes automotores.	41
Cuadro 12. Viscosidad de gases.	53
Cuadro 13. Viscosidad de líquidos.	54
Cuadro 14. Viscosímetros más comunes para determinar la viscosidad de los lubricantes.	62

## LISTA DE FIGURAS

	pag.
Figura 1. Rozamiento estático.	4
Figura 2. Desgaste adhesivo.	7
Figura 3. Desgaste abrasivo.	7
Figura 4. El colchón de aire se debe formar antes de que el elemento Empiece a funcionar.	15
Figura 5. Sistema básico de lubricación por circulación.	20
Figura 6. Después de un tiempo de operación, debido al giro del elemento, el lubricante tiende a salirse por los lados (en este caso por los extremos del muñón) escapándose gran parte, lo cual hace necesaria la relubricación.	22
Figura 7. Distribución de presión en un cojinete de fricción con un movimiento rotacional.	26
Figura 8. Lubricación Hidrodinámica.	26
Figura 9. Lubricación mixta o de película delgada.	27
Figura 10. Viscosidades de Gases.	52
Figura 11. Viscosidades de Líquidos.	55
Figura 12. El lubricante se debe aplicar en la zona de baja presión.	58
Figura 13. Viscosímetro de Saybolt.	65
Figura 14. Viscosímetro de Ostwald.	67
Figura 15. Carta de conversión de la viscosidad a cualquier temperatura.	68
Figura 16. Dimensiones del Viscosímetro	71
Figura 17. Representación del fondo del cilindro interno.	73
Figura 18. Diagrama para el cálculo de la resistencia eléctrica.	78

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $A$  Area de superficie
- Amp. Amperios
- Cm Centímetro
- $C_p$  Calor específico a presión constante
- $C_1$  Constante de calibración que depende de las características del viscosímetro
- $C_2$  Constante de calibración que depende de las propiedades del alambre, como del torque para vencer la fricción de los rodamientos.
- $^{\circ}\text{C}$  Grados centígrados
- D, $d$  Diámetros
- E.P. Extrema Presión
- $F$  Fuerza
- $F_f$  Fuerza de fricción
- $g$  Aceleración debida a la gravedad
- $G$  Modulo de rigidez
- $Gr$  Número de Grashof
- $h$  Coeficiente de transferencia de calor convectivo
- HP Caballos de Fuerza
- Hz Hertz
- $J$  Momento polar de inercia
- $k$  Conductividad térmica



*kgf* Kilogramos fuerza

L Longitud

$L_c$  Longitud característica

*m* Masa

*mm* Milímetros

*n* Número de pruebas realizadas

*N* Velocidad angular en r.p.m

*Nu* Número de Nusselt

*P* Potencia

$P_r$  Número de Prandtl

$Q$  Razón de flujo de calor

*R* Resistencia térmica

*r* Radio

$R_a$  Número de Rayleigh

$R_e$  Número de Reynolds

r.p.m. Revoluciones por minuto

*s* Segundos

$S_y$  Esfuerzo de fluencia

*T* Momento de Torsión en el alambre

$T_c$  Torque en el lado del cilindro

$T_d$  Torque en la base del cilindro interno

*u* Velocidad lineal

*V* Volumen

*V* Voltaje

*W* Watts

$a_0, a_1$  Parámetros de regresión mediante el método de los cuadrados mínimos

$b$  Constante experimental

$\Delta T$  Diferencia de temperaturas

$\sum$  Sumatoria

$q$  Angulo de deformación en grados Mac Michael

$m$  Viscosidad dinámica

$u$  Viscosidad cinemática

$r$  Densidad

$t$  Esfuerzo cortante

$w$  Velocidad angular en rad/s

## INTRODUCCIÓN

La lubricación es el aspecto fundamental en el funcionamiento de todas las partes móviles de las máquinas y equipos; ya que, con ayuda de los lubricantes se reduce la fricción y se disminuye el desgaste.

Para ello, es necesario conocer una de las principales propiedades de los lubricantes, como lo es la viscosidad, la cual se determina con ayuda de los viscosímetros.

La Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar (C.U.T.B), fundamenta la educación en el desarrollo de la investigación, la cual requiere de una formación teórico-práctica con un sentido de transformación social y económico como lo necesita la Región Caribe y el país.

La C.U.T.B cuenta actualmente con un apreciable número de equipos en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas y Térmicas, pero carece de un equipo que permita analizar el comportamiento de la viscosidad de los líquidos bajo el efecto de la temperatura; esto despertó el interés personal de los autores en satisfacer las inquietudes de tipo investigativo que contribuyen a la ampliación de los conocimientos atesorados a lo largo de la carrera.

Por tal motivo, y siendo la viscosidad con relación con la temperatura una de las características primordiales, surge el interés de dotar técnica y científicamente el laboratorio con un **BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYOS DE VISCOSIDAD EN LÍQUIDOS.**

Además, la comunidad universitaria y en especial, los estudiantes de la facultad de Ingeniería Mecánica, se beneficiarán con esta nueva ayuda didáctica, en virtud que estos encontrarán en el laboratorio un buen soporte logístico para el desarrollo de todas aquellas asignaturas adscritas al Departamento de Térmicas y Fluidos, contribuyendo a alcanzar el perfil de excelencia que persigue la Institución.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se ha estructurado la investigación en las siguientes partes: la primera tiene que ver todo lo relacionado a los tipos y formas de rozamiento y desgaste de todas las partes móviles de las máquinas, además de la manera como reducirlos.

La segunda parte muestra como se originan y fabrican los lubricantes, igualmente las propiedades, normas y clasificación de los lubricantes industriales y automotrices.

La tercera parte indica la aplicación específica de los lubricantes, sea industrial o automotriz.

La cuarta parte esquematiza como se puede calcular la viscosidad de los líquidos y gases, además de los factores que la afectan y los diferentes tipos de viscosímetros.

La quinta y sexta parte describe el diseño, y selección de los componentes principales del banco de pruebas para ensayos de viscosidad en líquidos.

La séptima parte indica el montaje, calibración y operación del equipo. En cuanto a la calibración del equipo se hizo a través de empresas especializadas como lo son: TERPEL DEL NORTE S.A. y SAYBOLT DE COLOMBIA LTDA. que da como garantía la obtención de los mejores resultados.

Finalmente, la octava parte, donde se realizan las experiencias con el Banco de Pruebas, y en las que se indica el procedimiento, la tabulación de los datos, las operaciones aritméticas para la determinación de la viscosidad en los lubricantes ensayados. Así mismo, se hará una serie de recomendaciones y conclusiones, producto de las mencionadas experiencias.

## 1. PRINCIPIOS BÁSICOS

### 1.1 ROZAMIENTO O FUERZA DE FRICCIÓN.

El rozamiento puede definirse como la fuerza que actúa para evitar o retardar el movimiento de una superficie cuando se desliza sobre otra. Este puede ser estático o dinámico.

**1.1.1 Rozamiento Estático.** El rozamiento estático entre dos cuerpos es la fuerza tangencial que se opone al deslizamiento de un cuerpo sobre otro.

Si se considera un peso  $W$  descansando sobre una superficie horizontal y se le aplica una fuerza tangencial  $F$ , se produce un deslizamiento del mismo. (Véase Figura 1). El cociente entre la fuerza necesaria para iniciar el movimiento y el peso, se le denomina coeficiente de rozamiento estático, siendo  $F_f$  la fuerza de fricción que se opone al movimiento.

El coeficiente de rozamiento estático viene dado por la expresión:

$$m = F / w$$

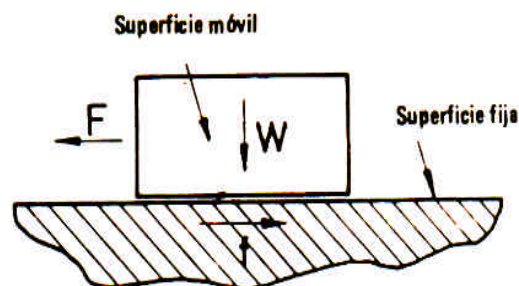


Figura 1. Rozamiento Estático.

**1.1.2 Rozamiento Dinámico.** Es la fuerza tangencial existente entre dos cuerpos después de haber empezado el movimiento. La fuerza requerida para iniciar el deslizamiento de un cuerpo es mayor que la necesaria para mantener dicho deslizamiento.

## **1.2 FORMAS DE REDUCCIÓN DE LA FRICCIÓN.**

Existen básicamente tres formas de reducir la fricción; éstas son: puliendo las superficies, cambiando el deslizamiento por rodamiento o colocando una película lubricante entre las superficies en contacto.

**1.2.1 Acabado Superficial o Pulimento de las Superficies.** Hasta cierto punto es económico lográndose la conservación de la maquinaria; sin embargo, cuando se quiere alcanzar un grado de pulimento muy alto la solución resulta costosa al necesitarse procesos muy sofisticados.

**1.2.2 Cambiando del Deslizamiento por Rodamiento.** Muchas veces existen mecanismos de maquinaria que se desplazan deslizando sobre otras superficies. En alguno de estos casos, se puede conseguir que los cuerpos giren en lugar de deslizarse reduciéndose la fricción, el desgaste y el consumo de potencia.

**1.2.3 Interponiendo un Lubricante.** Si se logra interponer entre las dos superficies de trabajo algún tipo de sustancia que las moje y separe, éstas se deslizarán fácilmente disminuyendo en gran parte la fricción, en ese momento se habrá cambiado la fricción sólida por fluida. Las sustancias que mejores resultados han presentado a través del tiempo son lubricantes hechos a base de vegetales, de grasas animales, derivados de hidrocarburos y los sintéticos.

En conclusión, la fricción no puede eliminarse en forma total con la tecnología del siglo XX. Solo podrá disminuirse en una cantidad apreciable en la medida en que las tres formas anteriormente descritas se combinen u optimicen. De igual manera, la interposición de un lubricante es el mejor método con el cual se puede disminuir la fricción a un mínimo grado.

### **1.3 DESGASTE.**

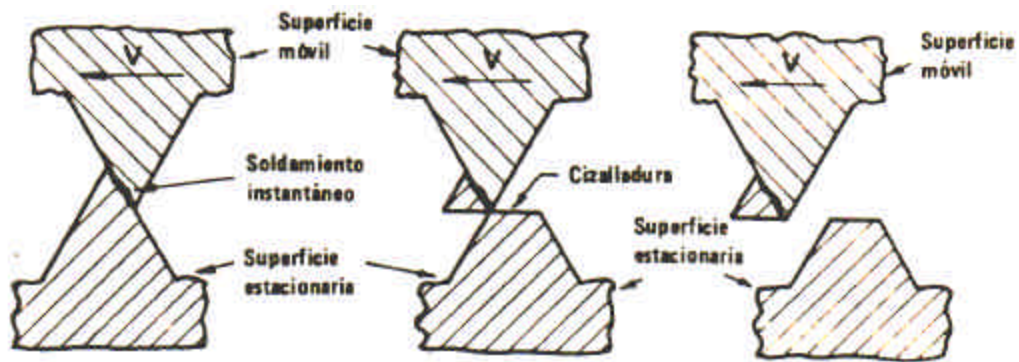
El desgaste se define como el deterioro que sufren las superficies en contacto a causa de la fricción. También puede explicarse el fenómeno de desgaste, como el producto de la formación y posterior ruptura de uniones o empalmes metálicos. Todas las superficies, por muy pulidas que estén, contienen irregularidades que resultan grandes en comparación con las dimensiones moleculares, el área o zona real de contacto será muy pequeña, y la presión local no corresponderá a la presión de cedencia del material. Esta intensa presión provocará la formación de uniones soldadas en los puntos de contacto, produciéndose el rompimiento de las mismas.

**1.3.1 Tipos de Desgaste.** De acuerdo a su origen, el desgaste se puede clasificar básicamente en mecánico y corrosivo.

**1.3.1.1 El desgaste mecánico.** Es aquel que se produce debido al movimiento relativo de las superficies en contacto. Este se subdivide en desgaste abrasivo, por adhesión y por fatiga.

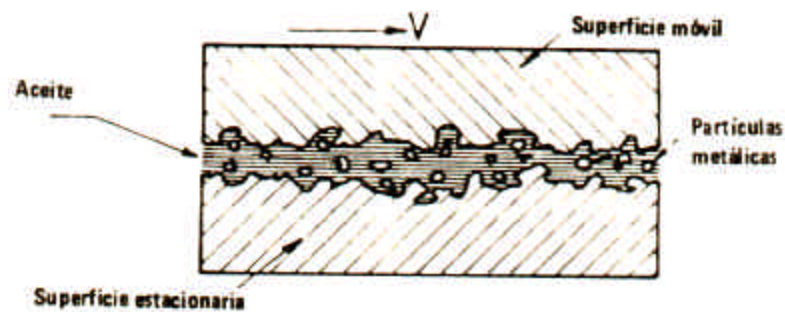
Otro tipo de desgaste mecánico en el cual se entrelazan las crestas y los valles existentes en las superficies metálicas, produciendo microsoldaduras y su posterior ruptura es el llamado desgaste adhesivo o friccionante, tal como se ilustra en la figura 2.





**Figura 2. Desgaste Adhesivo.**

**1.3.1.2 El desgaste abrasivo.** Ocurre a temperaturas normales, como consecuencia del contacto dinámico entre las superficies metálicas desgastadas y partículas o fragmentos abrasivos. Las más elevadas tasas de desgaste ocurren cuando la dureza del abrasivo es considerablemente mayor que la del material abrasado. Entre los materiales abrasivos más comunes están la arena, la grava, el polvo, las incrustaciones y los minerales. En la figura 3 se ilustra el fenómeno de desgaste abrasivo.



**Figura 3. Desgaste Abrasivo**

Por último se tiene el desgaste causado por la fatiga, en el cual los esfuerzos mecánicos prolongados y repetitivos producen desprendimiento y grietas superficiales.

Cuando una superficie está en contacto con elementos corrosivos tales como la humedad, el agua, ácidos, gomas, barnices y aglomerantes producidos por la

oxidación del lubricante, sufre alteraciones por ataques químicos. A tal fenómeno se le conoce como desgaste corrosivo.

Existen otras clases de desgaste menos importantes que los anteriores como son el desgaste eléctrico y el desgaste por cavitación. El primero se presenta debido a picaduras eléctricas, erosión por chispas, corrosión galvánica y ataque electrolítico. El segundo se debe a la formación de cavidades por roturas explosivas de burbujas en el fluido.

**1.3.2 Formas de Reducir el Desgaste.** Aún cuando es prácticamente imposible evitar el deterioro superficial causado por fenómenos mecánicos o químicos, se han desarrollado métodos con los cuales se reduce al mínimo y de manera efectiva el desgaste. Tales métodos comprenden diferentes tratamientos superficiales, así como también la utilización de una lubricación adecuada.

**1.3.2.1 Electroplástia.** La electroplástia o galvanización, es uno de los métodos utilizados para mejorar las propiedades superficiales de desgaste y corrosión. Este método consiste básicamente en aplicar, mediante deposición eléctrica, un revestimiento metálico a las superficies que estarán en contacto, con un material diferente al metal base. Con este revestimiento se logra mejorar el acabado superficial reduciéndose de esta manera el coeficiente de fricción y proteger al metal base del ambiente corrosivo.

**1.3.2.2 Carburización.** La carburización es uno de los métodos para producir endurecimiento superficial. Su principal aplicación está en las piezas de acero de bajo carbono (0,2 % o menos)<sup>1</sup>, las cuales se colocan en una atmósfera que contenga grandes cantidades de monóxido de carbono. A altas temperaturas se consigue que reaccione el monóxido de carbono con el hierro de la superficie, formándose una capa externa de alto carbono y gran dureza.

---

<sup>1</sup> AVNER, Sidney. Introducción a la Metalurgia Física. 2 ed. México: Mc Graw Hill, 1983. 317p.

**1.3.2.3 Nitruración.** La nitruración es otro de los procesos de endurecimiento superficial para aceros aleados. A diferencia del anterior, en este proceso se hace reaccionar el metal de la superficie con el nitrógeno para formar un revestimiento con nitruros. El resultado es una superficie resistente a la fatiga y al desgaste.

**1.3.2.4 Revestimiento con Metal Duro.** La producción de una capa superficial dura y resistente al desgaste, sobre metales, por soldadura es otro de los métodos utilizados para aumentar la resistencia al desgaste. A este proceso se le conoce como revestimiento con metal duro. El material de revestimiento duro se funde, ya sea mediante una llama de oxiacetileno o mediante arco eléctrico, y se esparce sobre el metal base y lo liga a él para formar una superficie nueva que puede alcanzar un espesor de  $\frac{1}{4}$  de pulgada. Este revestimiento es muy utilizado donde la lubricación sistemática es imposible, como en herramientas para perforación de pozos petroleros.

**1.3.2.5 Pulido Electromecánico.** El pulido electromecánico como método de endurecimiento superficial y como incrementador de la resistencia al desgaste, emplea una herramienta eléctrica de pulido, compuesta de carburo de titanio, que aplica una corriente en el punto de contacto y que es forzada contra la pieza en movimiento. La aplicación forzada de la herramienta contra la pieza en movimiento, unida al calor producido por el paso de la alta corriente eléctrica a través del punto de contacto, hace fluir el metal de la superficie, obteniéndose así una superficie uniforme, lisa y pulida.

**1.3.2.6 Con Lubricante.** Otra manera de reducir el desgaste es mediante la utilización de un lubricante adecuado, el cual debe ser el indicado para las condiciones de trabajo existentes, además de ser necesario un buen programa de lubricación.

A diferencia de los anteriores métodos en los cuales se varían las condiciones de las superficies en contacto, con la utilización de lubricantes se consigue separar tales superficies, disminuyendo de esta manera el desgaste.

## **2. LUBRICANTES**

### **2.1 ORIGEN DE LOS LUBRICANTES**

A través de la historia del hombre, se han utilizado varios tipos de lubricantes de acuerdo con las necesidades y los avances tecnológicos de la época. Hoy en día, se cuenta con cinco tipos de lubricantes según la naturaleza del origen. En el cuadro 1 se puede apreciar esta clasificación.

En la industria moderna los más usados son los derivados del petróleo. A partir del petróleo crudo se obtienen las bases con las cuales se manufacturan los aceites y grasas lubricantes. Estas bases son sometidas a procesos adicionales de tratamiento, tales como extracción por solventes, hidrogenación, desparafinado y filtración, para darles estabilidad y características especiales de aplicación.

Las bases obtenidas a partir del petróleo se conocen ampliamente como bases lubricantes minerales; sin embargo, se puede obtener por otros caminos, a partir del petróleo, las bases lubricantes sintéticas. Estas últimas se hacen combinando químicamente compuestos que tienen adecuada viscosidad para ser usados como lubricantes.

Las bases lubricantes minerales son una mezcla compleja de hidrocarburos; y las bases sintéticas son hechas por el hombre de tal manera que se tienen un perfecto control sobre su estructura molecular y propiedades químicas

**Cuadro 1. Clasificación de los lubricantes según su naturaleza**

CLASIFICACIÓN	DEFINICIÓN	ESTADO FÍSICO	EJEMPLOS
ANIMALES	Derivados de grasas animales	Sólido (Semi) Líquidos	Sebo, grasa Aceite de ballena
VEGETALES	Extraídos de semillas u pulpa de frutas	Líquidos	Aceites Hidrogenados Aceite de palma
MINERALES	Gases puros derivados del petróleo Minerales tratados	Gases Líquidos Semisólidos Sólidos	N <sub>2</sub> , Aire Aceite mineral Grasa lubricante Grafito, Talco
SINTÉTICOS	Productos polimerizados	Líquidos	Poliésteres Polialfaolefinas
COMPUESTOS	Mezcla de lubricantes animales o vegetales con derivados del petróleo	Líquidos Semisólidos	Lubricantes Especiales

## 2.2 FABRICACIÓN DE ACEITES MINERALES

Las bases lubricantes derivadas del petróleo crudo son obtenidas mediante diferentes procesos y tratamientos a los cuales éste se somete. Dentro de estos tenemos:

- DESTILACIÓN
- REFINACIÓN
- MEZCLAS

Los hidrocarburos utilizados en la fabricación de los lubricantes se clasifican básicamente en tres grupos: parafínicos, nafténicos y de base mixta o intermedia, de acuerdo con el tipo de crudo predominante.

La destilación de cada tipo de crudo genera una composición típica de las fracciones lubricantes de la cual dependerá posteriormente su utilización, la cual podemos resumir en el cuadro 2, así:

**Cuadro 2. Tipo de petróleo crudo**

<b>CONTENIDO DE:</b>	<b>PARAFÍNICO (%)</b>	<b>INTERMEDIO (%)</b>	<b>NAFTÉNICO (%)</b>
PARAFINA	45 – 60	5	15 - 25
NAFTÉNICA	20 – 30	60 – 75	65 - 75
AROMÁTICA	15 – 25	20 – 25	10
CERA	1 – 10	0 - 0.5	TRAZAS
ASFALTO	0 – 15	0 – 20	0 - 5

### **2.3 FUNCIONES DE LOS LUBRICANTES**

Un buen lubricante debe realizar determinadas funciones con el fin de que proteja adecuadamente las superficies metálicas. Las principales son:

- Disminuir frotamiento
- Reducir el desgaste
- Evacuar el calor (refrigerar) por conducción y radiación a través de las superficies metálicas, como en el caso de reductores, motores de combustión interna, compresores, etc.
- Facilitar el lavado (detergencia) y dispersancia de las impurezas.

### **2.4 CLASES DE LUBRICANTES**

Existen diferentes tipos de lubricantes que se recomiendan para cada caso específico:

- **Gases** : el más utilizado es el aire, que se emplea a presión y crea un colchón (de aire) entre los elementos en movimiento. Su principal aplicación es en pequeños cojinetes de fricción que giran a velocidades hasta de 100.000 r.p.m. en donde un lubricante convencional no serviría. Su capacidad de soporte de carga es muy pequeña del orden de  $0,70 \text{ Kgf/ cm}^2$  (10 psi). Este lubricante se utiliza principalmente en cojinetes hidrostáticos de empuje. A causa de la baja viscosidad de los gases, las pérdidas por rozamiento son sólo una fracción de las correspondientes a los lubricantes de cualquier clase. La figura 4. muestra cómo se aplica este tipo lubricante.
  
- **Líquidos**: en este caso se puede considerar cualquier tipo de fluido tal como el agua, aceite vegetal, animal y mineral; etc. El más utilizado en la actualidad es el aceite mineral que está constituido por una base lubricante y unos aditivos.
  
- **Semi-sólidos**: son compuestos que por su consistencia permiten que la película lubricante permanezca durante más tiempo en la superficie como, por ejemplo, la grasa que es una base lubricante y jabones (calcio, sodio, litio, aluminio, etc.).
  
- **Sólidos**: dan origen a películas lubricantes que reaccionan químicamente con la superficie, tales como el grafito, bisulfuro de molibdeno, mica, teflón, silicona, etc. y originan coeficientes de fricción muy bajos.

Los lubricantes más utilizados son los líquidos y semi-sólidos. En caso de ser imposible utilizarlos, se aplican lubricantes sólidos.



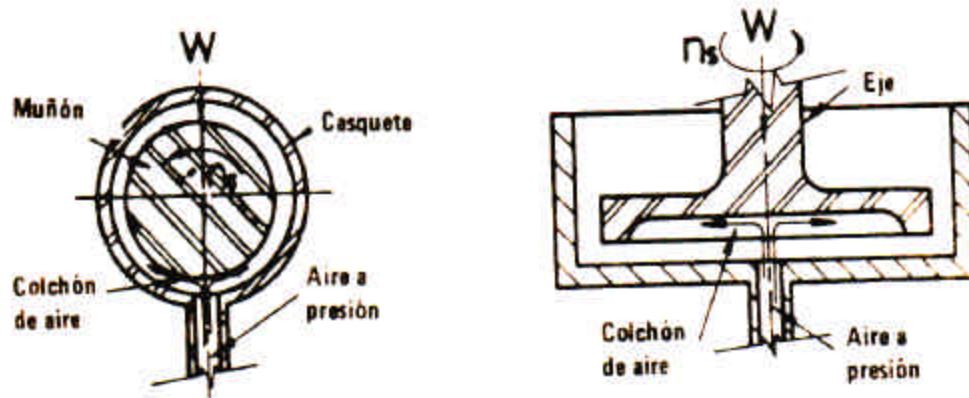


Figura 4. El colchón de aire se debe formar antes de que el elemento empiece a funcionar.

## 2.5 FACTORES QUE AFECTAN LA LUBRICACIÓN

Existen diferentes factores que en una u otra forma afectan el correcto desempeño del lubricante seleccionado, los más importantes son:

### De operación:

- Velocidad.
- Carga.
- Temperatura.
- Impurezas que pueden ser del medio ambiente o partículas metálicas que se desprenden de las superficies sometidas a fricción.
- Forma de operar la maquinaria.

### De diseño:

- Proyecto, cálculo y fabricación de la máquina.
- Materiales empleados en la construcción del mecanismo.

- Acabado superficial del mecanismo.
- Método de fabricación del mecanismo.
- Cálculo y método de aplicación del lubricante.

## 2.6 FACTORES QUE AFECTAN LA ACCIÓN DEL LUBRICANTE

Existen algunos factores negativos que, en un momento dado, hacen que el lubricante no trabaje eficientemente, éstos son:

**2.6.1 Humedad.** La humedad es perjudicial para el lubricante y para la superficie metálica. Un buen lubricante debe poseer buenas cualidades antiemulsionantes con el fin de que se separe rápidamente del agua cuando se halle en presencia de esta y cree una película protectora entre la superficie metálica y el medio circundante, para evitar su corrosión (cuando las condiciones son de humedad o de agua).

**2.6.2 Contaminación por Materiales Sólidos.** Si se logrará evitar por algún medio la contaminación de un aceite de circulación, éste podría utilizarse por mucho tiempo, pero el polvo, las partículas metálicas que se desprenden de las superficies en contacto, la condensación del agua del medio ambiente y las impurezas que penetran por empaquetaduras en mal estado, degeneran el aceite y es necesario, por lo tanto, cambiarlo.

Algunas veces existen factores que pueden contaminar el lubricante y que pasan desapercibidos como son una aplicación inapropiada, utilización de aceites y grasas contaminadas, periodos de tiempo muy prolongados sin cambiar el aceite, lo cual trae como consecuencia la oxidación del lubricante y la formación de materiales ácidos que atacan las superficies metálicas causando su corrosión.

Los contaminantes más importantes, sus causas y sus implicaciones son:

**Polvo y suciedad:**

- Se puede iniciar en la bodega de almacenamiento del lubricante si no está bajo buenas condiciones de limpieza y, más aún, si los envases se dejan destapados o los sellos están en mal estado.
- Cuando los recipientes en donde se va a transportar el aceite de la caneca a la máquina están sucios o no tienen tapas.
- Cuando por falta de mantenimiento y limpieza la máquina tiene capas de polvo sobre las partes a lubricar.
- Cuando los dispositivos a utilizar en la lubricación, tales como aceiteras y graseras, se encuentran en mal estado y no se limpian frecuentemente.
- En el aire, y si no se limpian ni cambian los filtros de aire y de aceite.
- En las operaciones con máquinas herramientas y procesos de fundición, debido a las emulsiones entre los refrigerantes y la arena de los moldes. Estos contaminantes son los más peligrosos ya que ocasionan desgaste abrasivo debido al contacto de éstas partículas sólidas con las superficies en movimiento. En algunos casos el polvo metálico reacciona con los aditivos destruyéndolos y acelerando la oxidación del aceite.

**Agua :**

- Cuando las máquinas dejan de funcionar y se enfrían, se produce la condensación de los vapores de agua presentes en la atmósfera. El agua también puede provenir de serpentines de enfriamiento defectuosos que permiten fugas y su paso posterior al depósito de aceite, los tambores mal almacenados y a la intemperie, debido al proceso de expansión y contracción

del recipiente (respiración), pueden transportar el agua almacenada en la tapa de la caneca hacia la superficie del aceite. Si esta agua no se drena o evacua rápidamente, causa el emulsinamiento del aceite a pesar de los aditivos antiemulsionantes que posea.

- El agua presente en el aceite forma emulsiones que, junto con las suciedades, dan origen a depósitos lodosos que taponan los conductos de circulación del aceite dejando los elementos mecánicos sin lubricación, causando recalentamiento de los mismos y descomposición del aceite. Estos fenómenos traen como consecuencia la destrucción total de la máquina.

**Fluidos para corte:** De éste contaminante existen dos tipos: solubles y no solubles.

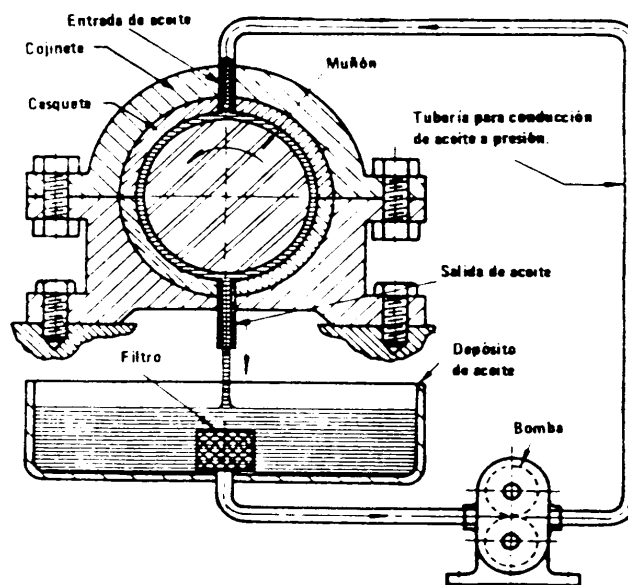
- La contaminación del aceite con este tipo de fluidos se puede presentar por la utilización de un volumen mayor que el recomendado en las máquinas herramientas, ya que se pueden producir salpicaduras hacia los depósitos de aceite de lubricación, o también por mal estado de los sellos, por residuos de estos fluidos en los recipientes donde se vacían los lubricantes y por descuido del operario encargado de la lubricación, lo que ocurre con mucha frecuencia, como es el utilizar equivocada o intencionalmente aceites para corte en la lubricación de elementos de máquina con la creencia de que es lo mismo o que resulta más económico lubricar con este tipo de aceites. En cualquier caso, estas contaminaciones alteran las características físicas y químicas de los lubricantes variando su viscosidad y estabilidad y dando lugar a una mala lubricación, y a recalentamientos, herrumbre, corrosión y desgaste destructivo de los elementos.
- Solventes : cuando se limpian los diversos mecanismos de una máquina pueden quedar películas superficiales de los solventes utilizados que luego, al aplicar los lubricantes, los adelgazan hasta tal grado que originan una

lubricación de película límite produciendo un desgaste exagerado en las piezas. Los solventes que se deben utilizar durante la limpieza deben ser altamente volátiles para que una vez realizada la operación de limpieza la superficie quede completamente seca, no se debe utilizar en la limpieza ACPM, gasolina, kerosene o petróleo ya que producen películas persistentes y diluyen el lubricante, (en caso de que no haya otra alternativa se deben limpiar posteriormente las piezas con aceites). Los recipientes utilizados para transportar los solventes no deben ser los mismos que para los lubricantes. Actualmente existen en el mercado aceites de limpieza que se mezclan en pequeñas proporciones con un aceite delgado y limpian completamente las superficies. Este aceite de limpieza se puede volver a utilizar, sin embargo por su baja proporción en la mezcla (4 - 5% por volumen) no resulte económico en algunos casos particularmente en donde se requieran condiciones estrictas de limpieza. Algunas veces se emplean también aceites delgados en la limpieza, éstos se aplican una vez que se ha extraído completamente el aceite usado el cual se puede volver a utilizar filtrándolo previamente y guardándolo en un recipiente bien hermético en otro tipo de aplicación (para prevenir su oxidación).

**2.6.3 Sistemas de Aplicación.** Existen diversos sistemas de aplicación que dependen de la velocidad, carga, eficiencia, posición de los elementos a lubricar, diseño, operación, etc.; se tiene por ejemplo sistemas de lubricación por baño, salpique, circulación, centralizados, a mano o mediante dispositivos especiales como graseras de presión o de copa, mecha, anillos, cadenas, etc. Los principales sistemas de aplicación son:

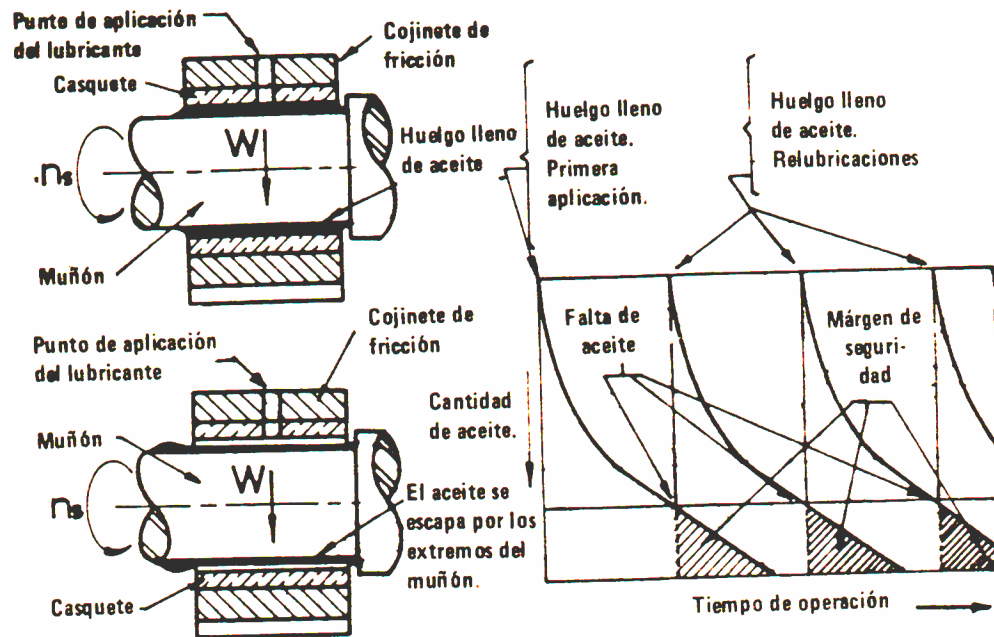
- **Sistemas de circulación:** Hay mecanismos que por sus velocidades de funcionamiento generan grandes cantidades de calor que es necesario evacuar, esto se logra únicamente mediante un flujo adicional del lubricante hacia esas partes. Por lo tanto es necesario utilizar una bomba de circulación que tome el aceite de un depósito y, mediante un sistema de conductos, le

lleve hasta los puntos deseados. Este sistema también se emplea para lubricar engranajes que, por su ubicación en un reductor, no alcanzan a ser lubricados por salpique o por baño. Bajo estas condiciones el aceite puede trabajar durante largos periodos sin perder sus características; por ejemplo un aceite de turbina puede permanecer en dicha máquina hasta por 15 años. Sin embargo, si el funcionamiento es continuo y el sistema está sometido a altas temperaturas, aún cuando el aceite posea buenas características de resistencia a la oxidación y a la formación de herrumbre, llegará un momento en que empezará a oxidarse y a formar lodos y lacas con el consiguiente aumento de la viscosidad y mal funcionamiento del sistema. Por lo tanto se deben asignar las frecuencias correctas en los cambios del aceite y tener cuidado de completar el nivel con el fin de asegurar el flujo correcto del lubricante. Un nivel demasiado bajo produce burbujas de aire en el sistema que, combinado con la alta temperatura debida al contacto metálico de las superficies por insuficiencia de lubricante, dan origen a la oxidación del mismo. La figura 5 representa un sistema básico de lubricación por circulación.



**Figura 5. Sistema básico de lubricación por circulación.**

- **Aplicación manual:** En este tipo de aplicación se considera que la película lubricante que se forma es delgada o mixta, es decir, que va a haber contacto metálico en ciertos puntos de la superficie lo cual no es muy recomendable y, además no se puede lograr una alimentación regular, continua y controlada. Cuando se aplique el lubricante habrá abundancia de éste y no existirá la posibilidad del contacto metálico entre las superficies pero, cuando el elemento empiece a funcionar, el lubricante se irá escapando por los extremos de éste y existirá la posibilidad de un aumento en la fricción. Si la frecuencia de aplicación y la cantidad de lubricante no son las adecuadas se puede presentar desgaste severo, recalentamiento de las piezas, las cuales pueden fallar por atascamiento, y un elevado consumo de potencia. La aplicación a mano es muy susceptible de errores ya que dependen en gran parte del operario que está realizando el trabajo de lubricar. Lo que para él parece ser una buena aplicación, puede ser en realidad deficiente en alto grado. En la figura 6. se da una idea de la forma como se escapa el aceite de un elemento lubricado a mano. Con la aplicación a mano se han obtenido, sin embargo, excelentes resultados cuando el lubricante se ha aplicado a intervalos iguales de tiempo y en la cantidad exacta que requiere el elemento para un correcto funcionamiento y disminución de la fricción. Este sistema es muy utilizado debido a su bajo costo y a que no requiere un personal especializado por ser muy fácil de llevar a cabo. La cantidad correcta de lubricante se puede determinar mediante tablas pero este dato no es muy exacto, ya que en muchos casos no se consideran las condiciones reales de operación de la maquinaria tales como presencia de polvo, agua, ácidos, altas temperaturas, sobrecargas, etc. Lo mejor es tomar esta frecuencia como punto de partida y luego ir verificando el comportamiento del elemento a través del tiempo hasta llegar a frecuencia definitiva.



**Figura 6.** Después de un tiempo de operación, debido al giro del elemento, el lubricante tiende a salirse por los lados (en este caso por los extremos del muñón) escapándose gran parte, lo cual hace necesaria la relubricación.

- **Aplicación por medio de un dispositivo:** Es un sistema de lubricación que da lugar a condiciones de película delgada pero es mucho más eficiente que el de aplicación a mano ya que suministra constantemente pequeñas cantidades de lubricante y en la cantidad exacta. Si por algún motivo se aplica en exceso ésta escurre y se pierde. Entre los dispositivos utilizados en este sistema se tienen: aceiteras gota-gota, mechas tipo sifón, graseras de resorte, lubricadores automáticos, aceiteras de cojín, aceitados de cadena, de collarín, etc. Se debe tener cuidado al elegir el tipo de dispositivo ya que si el lubricante es el adecuado pero el dispositivo no lo es, se presentará una lubricación deficiente y, por lo tanto, daños en los elementos. Por ejemplo, si se tiene un cojinete que gira a bajas revoluciones, con altas cargas, que se debe lubricar con un aceite grueso o de elevada viscosidad y se escoge para la aplicación de éste una aceitera de gota inadecuada, el flujo de aceite será tan escaso que en un momento dado esta cantidad desaparece de las superficies de fricción y



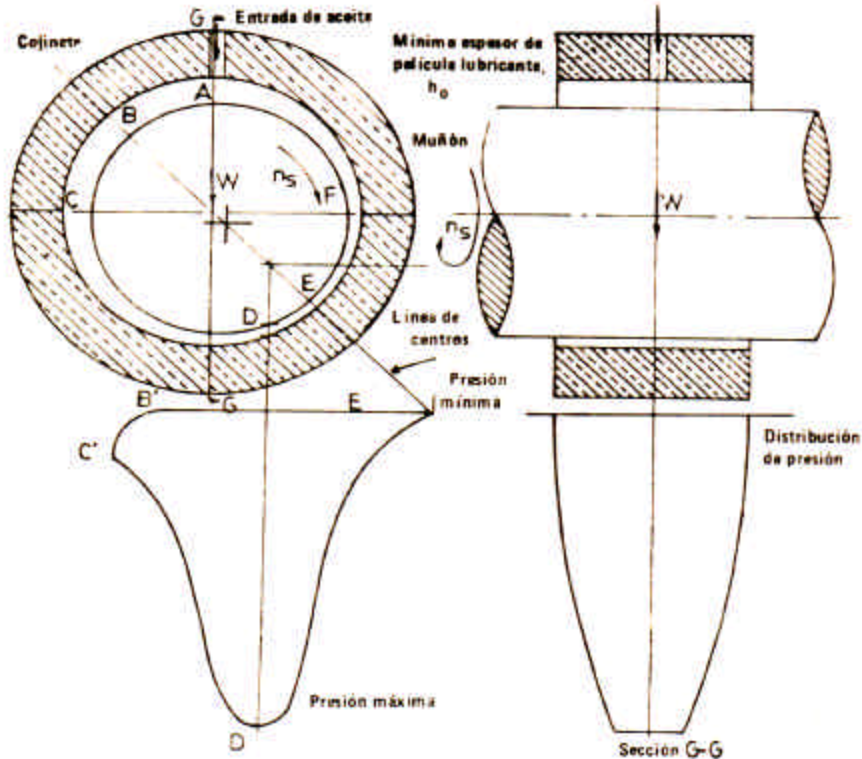
sobrevendrá la falla del cojinete. A estos dispositivos se les debe asignar una frecuencia de mantenimiento con el fin de limpiarlos y reponer las partes gastadas o deterioradas para que así, junto con el lubricante adecuado, proporcionen una lubricación adecuada.

**2.6.4 Puntos de Aplicación del Lubricante.** Los orificios de entrada del lubricante deben estar situados en el punto opuesto a donde se presenta la máxima presión; esto con el fin de que penetre el aceite fácilmente en la cantidad suficiente para que se forme la cuña de aceite. De otra manera se dificulta la entrada del aceite y en casos extremos se hace imposible su aplicación.

En la figura 7. se analiza en que forma se distribuye la presión en un cojinete de fricción. Se considera un eje girando a una velocidad determinada y con la entrada de lubricante por el punto de mínima presión A.

La elevación de presión se inicia en el punto B, donde el espacio entre el muñón y entre el casquete comienza a converger, la presión sigue aumentando a lo largo de C hasta un valor máximo en D, de aquí cae rápidamente hasta un valor mínimo en E, que es en donde la película lubricante presenta su mínimo espesor, este valor de presión permanece constante hasta F. En el gráfico de distribución de presiones se puede apreciar que la máxima resistencia de la película de aceite se presenta en la parte inferior del casquete.

En la figura derecha se muestra la distribución de presión a lo largo de la longitud del casquete, en el centro la presión permanece constante a lo largo de cierta longitud y cae rápidamente en los extremos debido a los escapes o fugas del lubricante. En muchos casos se utilizan ranuras de lubricación, que sirven como depósitos de aceites y grasas, con el fin de lograr un suministro más eficiente del lubricante y frecuencias entre lubricaciones más prolongadas.



**Figura 7. Distribución de presión en un cojinete de fricción con un movimiento rotacional**

Las ranuras deben situarse correctamente, ya que si su posición no es la adecuada disminuyen la capacidad de carga de la película lubricante que se rompe debido a la carga soportada por el cojinete, produciendo el contacto metálico entre las superficies.

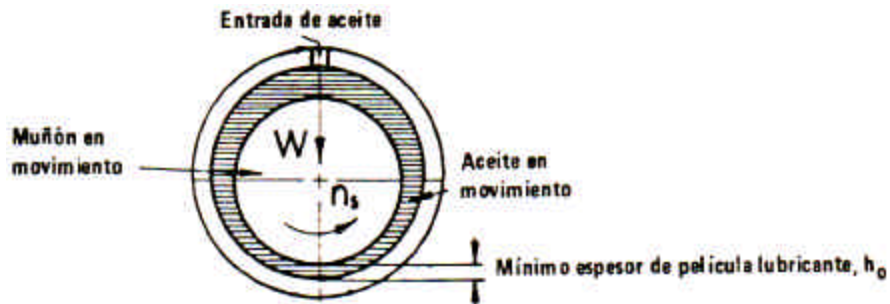
## 2.7 TIPOS DE LUBRICACIÓN

**2.7.1 Clasificación por Tipo de Película Lubricante.** Antes de definir los diferentes tipos de película lubricante, es necesario enunciar algunas características importantes de los líquidos.

### 2.7.1.1 Características de los Líquidos

- **Tensión superficial:** es la fuerza necesaria para separar un objeto de la superficie de un líquido. Esta relacionada con la viscosidad (numeral 2.8.1), con la temperatura y con la tendencia a emulsionarse. Dicho en otra forma es la fuerza de coherencia entre las moléculas del líquido.
  
- **Tensión interfacial:** es la fuerza con la que están unidas las superficies de dos líquidos disímiles, como el caso del agua y el aceite. Se ve afectada por la oxidación del aceite ya que los compuestos que se forman en esta reacción tienden a disminuirla y permiten que el aceite se emulsione, y que por lo tanto, no se separen.
  
- **Adhesión:** se relaciona directamente con la adherencia capilar superficial en una película lubricante y depende de factores como el acabado superficial y el grado de refinación del líquido. Una superficie muy pulida y un lubricante demasiado refinado no permiten una buena adhesión.
  
- **Saponificación:** aunque es propiamente una característica de las grasas y no de los líquidos, vale la pena incluirla en razón de la importancia que tienen las grasas lubricantes. La saponificación es un proceso por medio del cual una grasa reacciona con un álcali para formar un jabón, la glicerina u otro alcohol. Un aceite con un número relativamente alto de saponificación es muy susceptible de mezclarse con el agua. Esto es indeseable puesto que el lubricante pierde su capacidad de lubricar y la mezcla que es forma puede taponar todos los conductos de lubricación.
  
- **Emulsificación:** cuando un fluido entra en contacto con el agua y se mezcla con esta última, se forma una emulsión.

**2.7.1.2 Lubricación Hidrodinámica o de Película Fluida Completa.** La lubricación hidrodinámica o de película fluida completa es el tipo ideal de lubricación. Para su comprensión se analizará el caso más sencillo (ilustrado en la figura 8).



**Figura 8. Lubricación hidrodinámica.**

Antes de ser puesto en movimiento, el bloque está en contacto directo con la superficie estacionaria. La fricción inicial es sólida y por lo tanto alta. Sin embargo, tan pronto el bloque inicia su inercia, el borde de ataque encuentra un suministro de aceite, como el aceite ofrece resistencia al flujo debido a su fricción fluida, no es desplazado completamente, sino que una delgada capa de él permanece sobre la superficie de inercia, bajo el bloque, y éste entonces flota sobre la capa de aceite.

A medida que el bloque se levanta de la superficie de inercia más aceite se va acumulando debajo de él, hasta que la película de aceite alcanza un espesor equilibrado. En este punto, el aceite que está debajo del bloque es expulsado por la presión del peso de este tan rápidamente como entra, pero la viscosidad del aceite evita la pérdida excesiva causada por la acción aplastante de la carga.

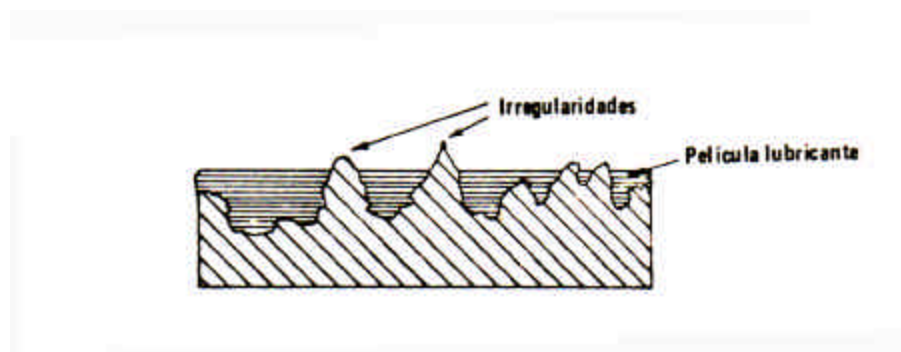
Con las dos superficies completamente separadas se ha establecido una película fluida completa y la fricción ha sido disminuida a un valor mínimo. Bajo estas condiciones el bloque asume una posición inclinada hacia atrás, que permite la

formación de una película en forma de cuña, condición especial para la lubricación a película fluida. El flujo convergente bajo del bloque desarrolla una presión. (Presión hidrodinámica) que soporta el bloque.

En conclusión, la lubricación con película fluida completa se efectúa porque se forma de una película en forma de cuña que genera unas presiones hidrodinámica que equilibran las cargas sobre los elementos en movimiento relativo. Se requiere, un cierto grado de tolerancia entre las superficies, que éstas no sean paralelas y, que el fluido presente una alta tensión superficial.

**2.7.1.3 Lubricación de Película Delgada o Mixta.** Este tipo de película permite una fricción intermedia entre la película límite y la hidrodinámica, ya que parte de la carga es soportada por la superficie y la otra por la película lubricante.

Cuando el elemento se pone en movimiento el desgaste excesivo debido a que la superficie esta levemente recubierta con una película delgada que deja al descubierto la mayoría de irregularidades. (Ver figura 9). Este tipo de película se puede originar a un suministro inadecuado de lubricante o a que se está utilizando un aceite demasiado delgado que no alcanza a formar la película correcta.



**Figura 9. Lubricación mixta o de película delgada.**

**2.7.1.4 Lubricación de Película Límite.** Se presenta cuando las condiciones de velocidad, carga, temperatura y método de aplicación del lubricante no son favorables para la formación de una película fluida completa. En este caso el

lubricante está recubriendo solo parcialmente la superficie dejando al descubierto la mayor parte de ellas y por lo tanto la fricción se considera completamente sólida.

**2.7.1.5 Lubricación Elastohidrodinámica.** Este tipo de lubricación se presenta cuando se introduce un lubricante entre superficies que están en contacto rodante, como es el caso de engranajes y cojinetes de rodamiento. Las irregularidades presentes en la superficie, debido a las altas cargas, sufren una deformación elástica que trae como consecuencia un aumento en el área de contacto y la película lubricante interpuesta entre dichas superficies aumenta de viscosidad debido a la presión de bombeo. Esa película de mayor viscosidad separa adecuadamente las superficies, disminuyendo de esta manera el desgaste.

**2.7.1.6 Lubricación con Materiales Sólidos.** Con los materiales sólidos se forma una fina película lubricante que cubre completamente todas las irregularidades de la superficie, dejándola totalmente lisa.

Los lubricantes sólidos se usan en cojinetes que tienen que trabajar a temperaturas extremas. Entre los más comunes, como lubricantes sólidos se utilizan el grafito, bisulfuro de molibdeno, bisulfuro de tungsteno, el teflón, el polietileno, la mica y el talco.

**2.7.1.7 Lubricación por Extrema Presión.** Existen condiciones extremas para lubricar, en las cuales no es posible mantener una película fluida completa. Algunas veces las velocidades son tan bajas o las presiones tan grandes que hasta los aceites más viscosos no pueden evitar el contacto metal - metal. En otros casos la operación intermitente causa rotura de la película lubricante. De otro lado, la lubricación de ciertos engranajes altamente cargados no puede ser satisfecha por aceites de viscosidades comunes, debido a las pequeñas áreas de contacto entre dientes con movimientos de inherencia y rodamiento combinados.

A estos casos se les hace frente con lubricación extrema presión o marginal. Método efectivo en ausencia de película fluida completa. Las propiedades necesarias se logran incorporando aditivos cuyo efecto es aumentar la capacidad de carga del lubricante, es decir, en la lubricación aunque no haya película fluida completa o ésta sea demasiado delgada se garantiza una lubricación adecuada aumentando la capacidad para soportar carga a esa ligera película.

En condiciones de extrema presión el contacto metal - metal es inevitable, por lo tanto, el objeto del lubricante es impedir que se formen soldaduras en las superficies en movimiento se aferren unas a otras, lo cual produciría desgarraduras en la superficie del material que es lo que finalmente conocemos como desgaste.

La acción de los aditivos de extrema presión (EP), los cuales son de naturaleza química, y que son productos generalmente compuestos de agentes activos como el azufre, fósforo y cloro, y que su función específica es reaccionar con las superficies metálicas, bajo condiciones establecidas de temperatura y presión, haciendo que las superficies en contacto se deslicen una sobre otra, sin formación de soldaduras, es importante anotar que estos aditivos operan solo cuando el elemento o piezas en contacto son sometidas a altas cargas, lo cual como es lógico generará altas temperaturas por el incremento de la fricción, llegando a superar los 200° C, es en ese momento cuando se presenta la reacción de los aditivos convirtiéndose en una película que disminuye la fricción y evita de esta forma la soldadura de las superficies.

## **2.8 PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS MÁS IMPORTANTES**

**2.8.1 Viscosidad.** Es la propiedad más importante de los aceites lubricantes. Se define como la resistencia de un fluido a moverse o a fluir. Su magnitud varía en forma inversa al incremento de la temperatura. Existen dos formas de expresar la viscosidad:

- **Viscosidad absoluta:** que representa la viscosidad real de un líquido y se mide por el tiempo que tarda en fluir un líquido por una serie de tubos capilares. La unidad de medición es:

**SISTEMA MÉTRICO:** *Poise* 
$$Poise = \frac{Dina * seg}{cm}$$

**SISTEMA INGLÉS:** *Reyn* 
$$Reyn = \frac{lb_f * seg}{in}$$

**SISTEMA DIN:** (*Pascal x segundo*) 
$$(Pas) = \frac{N * seg}{mm^2}$$

Entre estos sistemas existen las siguientes relaciones:

$$1 Reyn = 6.895.031 \text{ centipoises}$$

$$1 Pas = 1.000 \text{ centipoises}$$

- **Viscosidad cinemática:** se define como la viscosidad absoluta del fluido dividida por la densidad del fluido, se expresa en el mismo sistema de unidades y a la misma temperatura. La unidad de medida que se utiliza para expresar esta viscosidad es:

**SISTEMA MÉTRICO:** *Stoke* 
$$1 \text{ centistoke} = \frac{mm}{seg}$$

Existen otras unidades de medición de viscosidad en los fluidos, estas son: Segundos Saybolt Universal, Segundos Redwood No. 1 y No. 2, Segundos Furol y Grados Engler.



El método definido por ASTM (American Standard for Testing and Materials) son las normas **D88** y **D445**.

**2.8.2 Índice de Viscosidad.** Después de la viscosidad es la característica más importante de los lubricantes y se define como la estabilidad de la viscosidad de un fluido con el cambio de la temperatura del mismo. Entre mayor sea el índice de viscosidad ( **I.V.**) más estable es un aceite, la mayoría de los aceites derivados del petróleo tienen I.V. comprendido entre 0 y 100, este valor es adimensional. Para la determinación del índice de viscosidad de un aceite se utiliza el método **ASTM D2270**.

**2.8.3 Punto de Inflamación y Llama.** Son las temperaturas del fluido a las cuales los gases formados se inflaman por un instante ( Flash point) o pueden tener la llama activa ( Fire point). La primera temperatura suele ser entre 22 a 28°C más baja que la segunda. Los aceites cuyo punto de chispa sea menor que 150°C no deben ser utilizados para fines de lubricación. La temperatura de la llama no debe confundirse con la de auto inflamación, que es aquella en la cual un aceite se quema sin aplicación de una chispa o llama. Para la determinación de estas temperaturas se utiliza el método **ASTM D92-57**.

**2.8.4 Gravedad Específica.** Se conoce como gravedad específica la relación entre el peso de un volumen de aceite y el peso de idéntico volumen de agua a una temperatura determinada, por regla general la temperatura de la medición es de 15.6°C ( o 60°F) es un parámetro adimensional. Para la determinación se utiliza el método **ASTM 287 - 55**.

**2.8.5 Demulsibilidad.** Es la resistencia de un aceite lubricante a la formación de una emulsión con el agua, esto es, la capacidad de no mezclarse con el agua. Cuando un aceite no se separa del agua, este aceite puede causar problemas de corrosión en el equipo, mala lubricación e incrementos de temperatura. Su

medición se hace en porcentaje de volumen de agua, el método más utilizado para su determinación es el **ASTM D1401**.

**2.8.6 Valor de Neutralización TAN y TBN.** El deterioro de un aceite en servicio, es decir, su grado de oxidación está generalmente acompañado de un aumento en la acidez del fluido. Existen tres métodos para determinar el grado de la acidez o alcalinidad en los aceites lubricantes y son:

- **Valor numérico de neutralización:** el cual se mide en mg KOH/mg de muestra y se rige por el método **ASTM D974**.
- **Número de ácido total:** permite determinar la presencia de ácidos nafténicos en aceites refinados o ácidos orgánicos en aceites mezclados.
- **Número de base total:** se expresa en mg de KOH y permite determinar la cantidad de constituyentes básicos (alcalinos) presentes en un gramo de muestra.

La determinación de TAN y TBN se hacen bajo el método **ASTM 664**.

**2.8.7 Consistencia de la Grasas Lubricantes o Punto de Penetración.** Mide la dureza de una grasa en décimas de milímetro de una punta de penetrómetro durante un tiempo definido, este procedimiento es clasificado y calificado por la norma National Lubricating Gaease Institute (NGLI).

**2.8.8 Punto de Goteo.** Se define como la temperatura a la cual una grasa fluye por acción de la gravedad. Esta propiedad es muy importante conocerla para una correcta aplicación en uso de las grasas.

**2.8.9 Resistencia al Agua.** Es la medida de la permanencia de ésta sobre la parte lubricada cuando el agua tiende a desalojarla. Esta es una de las propiedades que permiten determinar la aplicabilidad de una grasa dependiendo del tipo de jabón utilizado en la fabricación.

## **2.9 NORMAS Y CLASIFICACIÓN DE LUBRICANTES INDUSTRIALES**

**2.9.1 Normas ISO para Lubricantes.** La Organización Internacional para la Estandarización (ISO), ha definido una serie de normas para los aceites lubricantes industriales con el fin de prevenir equivocaciones y malas aplicaciones en razón de la diversificación de las marcas, medidas y en la clasificación de la viscosidad.

Los apartes más importantes de esta son:

1. La medida de la viscosidad se hará en centistokes utilizando solamente dos temperaturas de referencia que son: 40°C y 100°C.
2. El sistema ISO únicamente relacionará la viscosidad del aceite y no participará en la definición de las características técnicas (aditivos), o su calidad.
3. Este sistema únicamente clasifica aceites industriales.
4. Permite encontrar en forma exacta y rápida el equivalente de viscosidad de un aceite en diferentes marcas sin temor a equivocaciones.
5. El grado ISO de un aceite debe aparecer al final del nombre del mismo, cualquiera que sea su marca.

El cuadro 3 describe las viscosidades y su grado ISO. En dicha tabla de trabajo queda definido que la variación de la viscosidad no debe ser mayor ni menor al 10% del número del grado ISO.

**Cuadro 3. Clasificación ISO para aceites industriales**

GRADO ISO	LÍMITE DE VISCOSIDAD (40°C) MÍNIMO	LÍMITE DE VISCOSIDAD (40°C) MÁXIMO	VALOR VISCOSIDAD
2	1.98	2.42	2.2
3	2.88	3.52	3.2
5	4.14	5.06	4.6
7	6.12	7.48	6.8
10	9.00	11.0	10
15	13.5	16.5	15
22	19.8	24.2	22
32	28.8	35.2	32
46	41.4	50.6	46
68	61.2	74.8	68
100	90	110	100
150	135	165	150
220	198	242	220
320	288	352	320
460	414	506	460
680	612	748	680
1000	900	1100	1000
1500	1350	1650	1500

**2.9.2 Normas AGMA para Lubricantes.** La American Gear Manufacturers Association (AGMA), desarrolló normas para los aceites industriales para los engranajes, en los diversos tipos y grados de viscosidad y se conocen como los números AGMA para lubricantes. Los rangos de viscosidad definidos por estos números figuran en el cuadro 4. En el rango de viscosidad en que los dos sistemas se superponen, la norma AGMA concuerda con el sistema de clasificación ISO.

**Cuadro 4. Clasificación AGMA para lubricantes**

NÚMERO AGMA PARA LUBRICANTE	RANGO DE VISCOSIDADES cSt (40°C) MÍNIMO	RANGO DE VISCOSIDADES cSt (40°C) MÁXIMO	VALOR DE VISCOSIDAD ISO (40°C)
1	41.4	50.6	46
2,2 EP	61.2	74.8	68
3,3 EP	90	110	100
4,4 EP	135	165	150
5,5 EP	198	242	220
6,6 EP	288	352	460
7 Comp., 7 EP	414	506	680
8Comp., 8 EP	612	748	1000
8 <sup>a</sup> , Comp., 8A EP	900	1100	1500
9,9 EP	1350	1650	
10,10 EP	2880	3520	
11,11 EP	4140	5060	
12	6120	7480	
13	25000	38400	
	CSt	(100°C)	
14R	428	857	
15R	857	1714	

Los aceites marcados “Comp.”, son los que están compuestos con un 3% a 10% de sebo sin acidez u otras grasas animales apropiadas.

La norma **AGMA 250.04** abarca la lubricación de transmisiones industriales por engranajes cerrados e incluye especificaciones para tres tipos de aceite para engranajes: los aceites para engranajes con inhibidores de herrumbre y oxidación (R&O Rust and Oxidation Inhibited), los lubricantes de Extrema Presión (EP) y los aceites compuestos para engranajes. Los lubricantes sintéticos para engranajes están incluidos, pero no hay especificaciones especiales.

Los siguientes cuadros nos indican las características funcionales que se encuentran especificadas en la norma AGMA 250.04.

**Cuadro 5. Especificaciones AGMA de aceites R&O para engranajes industriales**

PROPIEDAD	MÉTODOS DE ENSAYO	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN
VISCOSIDAD	ASTM D445	NUMEROS AGMA PARA LUBRICANTES DEL 1 HASTA EL 6 Y DEL 7 Comp. Hasta el 8 Comp.
INDICE DE VISCOSIDAD	ASTM D2270	GRADO AGMA HORAS 1 Y 2 1500 3 Y 4 750 5 Y 6 500
PROTECCIÓN CONTRA LA HERRUMBRE	ASTM D665B	SIN HERRUMBRE DESPUÉS DE 24 HORAS CON AGUA DE MAR
PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN	ASTM D130	COLOR No. 1 DESPUÉS DE TRES HORAS A 120°C
SUPRESIÓN DE ESPUMA	ASTM D892	SECUENCIA I, II ,III : 70/10 ml
DEMULSIBILIDAD	ASTM D2711	AGUA EN ACEITE 0.5% Max. EMULSIÓN DESPUÉS DE CENTRIFUGAR 2.0 ml Max. AGUA LIBRE TOTAL 3.0 ml Min.
LIMPIEZA	NINGUNO	AUSENCIA DE POLVO ABRASIVO

**Cuadro 6. Especificaciones AGMA de aceites de Extrema Presión para engranajes**

PROPIEDAD	MÉTODO DE ENSAYO	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN
VISCOSIDAD	ASTM D 445	NUMEROS AGMA PARA LUBRICANTES DEL 2 EP HASTA EL 8A EP
INDICE DE VISCOSIDAD	ASTM D 2270	90 COMO MINIMO
ESTABILIDAD A OXIDACIÓN	ASTM 2893	10% Max. AUMENTO DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 95°C
PROTECCIÓN CONTRA HERRUMBRE	ASTM D 665A	SIN HERRUMBRE DESPUÉS DE 24 HORAS CON AGUA

PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN	ASTM D 130	COLOR No. 1 DESPUÉS DE 3 Hr A 100°C
SUPRESIÓN DE ESPUMA	ASTM D 892	SECUENCIA Y, I, II, III, : 75/10ml Max.
DEMULSIBILIDAD	ASTM D 2711	GRADO 2 - 6 EP 7 - 8 EP AGUA 1% 1% EMULSIÓN 2 ml 4ml AGUA LIBRE 60 ml 50 ml
PROPIEDAD	MÉTODO DE ENSAYO	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN
LIMPIEZA	NINGUNO	AUSENCIA DE POLVO Y ABRASIVOS
PROPIEDAD EP	PRUEBA TIMKEN, PRUEBA FZG	CARGA DE 60 LIBRES MÍNIMO 11 ETAPAS
SOLUBILIDAD DE ADITIVOS	NINGUNO	FILTRABLE POR 25 MICRAS (EN HÚMEDO O SECO) SIN PÉRDIDA DE ADITIVO EP.

## 2.10 NORMAS Y CLASIFICACIÓN DE LUBRICANTES AUTOMOTRICES.

**2.10.1 Norma API Para Lubricantes.** El Instituto Americano del Petróleo (API), ha definido una clasificación para la calidad de los aceites de uso automotriz únicamente.

El instituto estableció una serie de categorías de acuerdo con el año de fabricación y el tipo de combustión del motor.

- **Aceites para motores a gasolina:** Se designó la clasificación con dos letras, siendo la primera para identificar el tipo de motor “S” para gasolina y la segunda el periodo de tiempo de fabricación del motor siguiendo el orden alfabético. En el cuadro 7 se indican como quedan definidas las dos primeras letras.

- **Aceites para motores Diesel:** Se designan con la letra “C” y tiene una distribución en el tiempo menor que los motores a gasolina. La clasificación se muestra en el cuadro 8.
  
- **Aceites para engranajes automotores:** el Instituto Americano del Petróleo también ha definido una clasificación especial para los aceites que se utilizan para lubricar cajas, diferenciales y transmisiones automotrices en el cuadro 9 se muestra su clasificación.

**Cuadro 7. Clasificación API de aceites para motores a gasolina**

CLASIFICACIÓN	TIPO DE SERVICIO	CARACTERÍSTICAS DEL ACEITE
SA	NO SE EMPLEA	SOLO BASE LUBRICANTE
SB	NO SE EMPLEA	BASE LUBRICANTE MÁS ANTIOXIDANTE Y ANTICORROSIVOS
SC	PARA MOTORES ENTRE 1964 Y 1967	SE MEJORAN LOS ADITIVOS ANTIOXIDANTE Y ANTICORROSIVO
SD	PARA MOTORES ENTRE 1968 Y 1971	
SE	PARA MOTORES ENTRE 1972 Y 1980	
SF	PARA MOTORES ENTRE 1980 Y 1988	IGUAL A LOS ANTERIORES CON MEJORES PROPIEDADES CONTRA LA FORMACIÓN DE DEPÓSITOS, HERRUMBRE Y CORROSIÓN
SG	PARA MOTORES ENTRE 1990 Y 1993	SE MEJORA LA PROTECCIÓN CONTRA EL DESGASTE, OXIDACIÓN Y FORMACIÓN DE LODOS
SH	PARA MOTORES ENTRE 1992 Y 1998	SE MEJORA LA PROTECCIÓN CONTRA EL DESGASTE, OXIDACIÓN Y FORMACIÓN DE LODOS, ADITIVOS DETERGENTES



**Cuadro 8. Clasificación API de aceites para motores Diesel**

<b>CLASIFICACIÓN</b>	<b>TIPO DE SERVICIO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DEL ACEITE</b>
CA	MOTORES DE TRABAJO LIVIANO O MODERADO 1940 – 1950	PROTECCIÓN A COJINETES Y FORMACIÓN DE DEPÓSITOS PARA MOTORES DE ASPIRACIÓN NATURAL
CB	MOTORES DE TRABAJO LIVIANO O MODERADO 1950 – 1961	BRINDAN PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN, FORMACIÓN DE DEPÓSITOS Y DESGASTE POR LATO AZUFRE EN EL COMBUSTIBLE
CC	MOTORES DE TRABAJO MODERADO A SEVERO 1961 – 1965	PROVEEN PROTECCIÓN A MOTORES SOBREALIMENTADOS
CD	MOTORES DE TRABAJO SEVERO 1965 – 1987	BRINDAN CONTROL EFECTIVO AL DESGASTE Y FORMACIÓN DE DEPÓSITOS EN MOTORES DE ALIMENTACIÓN NATURAL O TURBOCARGADOS
CD – II	PARA SERVICIO DE MOTORES DIESEL DE DOS TIEMPOS DE TRABAJO SEVERO	CONTROLA EL DESGASTE Y LA FORMACIÓN DE DEPÓSITOS
CE	MOTORES DE TRABAJO SEVERO TURBOALIMENTADOS A PARTIR DE 1987	MEJOR CALIDAD DE LOS ADITIVOS DE LAS CATEGORÍAS ANTERIORES
CF	MOTORES DE TRABAJO SEVERO 1987 – 1990	PARA USAR CON COMBUSTIBLE QUE TENGA ALTO CONTENIDO DE AZUFRE REEMPLAZA AL CD
CF – II	PARA SERVICIO DE MOTORES DIESEL DE DOS TIEMPOS DE TRABAJO SEVERO	REEMPLAZA LA CATEGORÍA CD - II
CF – 4	PARA MOTORES DE 4 TIEMPOS Y ALTA VELOCIDAD	MEJORA LAS CARACTERÍSTICAS DEL CE

**Cuadro 9. Clasificación API de aceites para engranajes de automotores**

CLASIFICACIÓN	TIPO DE SERVICIO	ADITIVOS
GL - 1/ GL - 2	CONDUCCIONES SUAVES BAJA PRESIÓN Y/O DESLIZAMIENTO	INHIBIDORES DE HERRUMBRE Y OXIDACIÓN, DEPRESORES DE PUNTO DE FLUIDEZ, NO TIENE AGENTE EP NI MODIFICADORES DE FRICCIÓN
GL - 3	CONDICIONES MODERADAS DE DESLIZAMIENTO Y CARGA	AGENTES EP DE ACCIÓN MODERADA, REACCIONAN SOBRE LAS SUPERFICIES DENTADAS CUANDO ALCANZAN LA TEMPERATURA DE TRABAJO, POR ALTA CARGA
GL - 4	CONDICIONES SEVERAS DE DESLIZAMIENTO, CARGA	AGENTE EP DE ACCIÓN MEDIA Y ALTA
GL - 5	CONDICIÓN MUY SEVERA DE DESLIZAMIENTO Y CHOQUE	AGENTE EP DE ALTÍSIMA PROTECCIÓN
GL - 6	CONDICIÓN MUY SEVERA DE DESLIZAMIENTO Y CHOQUE ESPECIALMENTE	AGENTES EP PARA ALTÍSIMA PROTECCIÓN

**2.10.2 Norma SAE para Lubricantes.** La Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) ha definido, igual que la ISO, una serie de normas para la clasificación del valor de la viscosidad y el índice de viscosidad de los aceites lubricantes automotrices.

Los apartes más importantes de estas normas son:

- La SAE clasifica los lubricantes para automotores de combustión interna y para los engranajes automotores, de acuerdo con la viscosidad y sus posibilidades de uso a temperaturas bajo cero °C.
- La SAE define los requerimientos del aceite lubricante en condiciones de invierno con la letra “W”, adicionada al requisito de índice de viscosidad.

- La norma SAE no relacionará las necesidades de aditivos adicionales.
- La norma SAE solamente clasificará la viscosidad de los aceites automotores.

En los cuadros 10 y 11 se muestran los diferentes grados de SAE de viscosidad de los aceites para motores de combustión interna y engranajes automotores respectivamente.

**Cuadro 10. Clasificación SAE de aceites para motores de combustión interna**

GRADO SAE	LÍMITE DE VISCOSIDAD EN CENTISTOKES			
	A 40°C		A 100°C	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
0W	19		3.8	
5W	21		3.8	
10W	26		4.1	
15W	42		5.6	
20W	50		5.6	
25W	110		9.3	
10	46	50	5.6	6.9
20	55	60	5.6	9.3
30	109	113	9.3	12.5
40	140.6	189.3	12.5	16.3
50	192.4	267.6	16.3	21.9
5W50	100	120	16.3	19.7
10W30	60	70	9.3	12.5
15W40	90	110	12.5	16.3
15W50	120	130	16.3	19.7
20W30	90	110	9.3	12.5
20W40	120	130	12.5	16.3

**Cuadro 11. Clasificación SAE de aceites para engranajes automotores**

GRADO SAE	LÍMITE DE VISCOSIDAD EN CENTISTOKES			
	A 40°C		A 100°C	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
75W	20	22	3.8	4.4
80W	65	70	7	9.4
85W	12	130	11	13
80	75	80	8.6	11.3
90	200	220	13.5	24
140	420	440	24	41

240	1200	1400	55	60
80W90	120	130	14	15
85W90	185	200	16.5	17.3
85W140	300	320	24.1	26

**2.10.3 Norma ICONTEC para Lubricantes.** El instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, ha elaborado las normas 1295, 1399, 1731, 1840 y 1851 relativas a los lubricantes, en ellas se especifican los aceites y grasas para equipos automotores (motores, transmisiones y cajas de velocidad), para uso en Colombia y los requerimientos de las bases lubricantes y vírgenes y recicladas para su posterior utilización en la fabricación de lubricantes.

## 2.11 ADITIVOS

Las exigencias de lubricación de los modernos equipos y grandes máquinas han creado la necesidad de mejorar las propiedades, calidad y características intrínsecas de los lubricantes, mediante la incorporación de aditivos químicos.

Y, por el hecho de que solo se requieren pequeñas cantidades de tales compuestos químicos para modificar grandemente el comportamiento de los aceites, se ha generalizado muchos empleos.

**2.11.1 Definición de Aditivo.** Se definen los aditivos como aquellos compuestos destinados a mejorar las propiedades naturales de un lubricante y, proporcionarle otras que no posee y que son necesarias para cumplir con determinados requerimientos.

**2.11.2 Propiedades Generales de los Aditivos.** Los aditivos se incorporan a los aceites lubricantes en diversas proporciones para conseguir que éstos cumplan con cada uno de los requerimientos a que estarán sometidos. Algunos de los objetivos de utilizar los aditivos son:

- Limitar el deterioro del lubricante a causa de fenómenos químicos ocasionados por razón del medio donde trabajan o por la función que cumplen.
- Proteger la superficie lubricada de la agresión de ciertos contaminantes.
- Mejorar las propiedades físico-químicas del lubricante o proporcionarle otras nuevas.

De las propiedades que deben presentar los aditivos, las más importantes son la solubilidad en la base lubricante, insolubilidad, la volatilidad, la estabilidad y la compatibilidad.

Un aditivo debe ser soluble en la base lubricante en cualquier rango de temperatura de funcionamiento. La razón de esto es que ante determinadas condiciones de temperatura, el lubricante debe conservar las propiedades que lo hacen característico en su aplicación. De no ser así, los aceites no darían los resultados que de ellos se esperan, pudiéndose producir su descomposición, disolución o separación de los aditivos.

La insolubilidad es otra propiedad que se requiere en los aditivos, para que en presencia de agua no se produzca su disolución o separación del aceite. Igual comportamiento se requiere de los aditivos en condiciones de altas temperaturas, para que al estar el aceite bajo esas circunstancias no se produzca la evaporación de los mismos, debiendo para ello, poseer baja volatilidad.

La compatibilidad de los aditivos es de las características más importantes que de ellos se requiere. La importancia de esta propiedad cobra valor cuando se tienen dos o más aditivos presentes en una misma base lubricante, es decir, cuando a un aceite se le adicionan varios aditivos para que pueda cumplir adecuadamente sus funciones. Lo anterior se refiere a la necesidad de que no reaccionen los aditivos, unos con otros, y formen sustancias perjudiciales y corrosivas al entrar en

contacto con otros contaminantes, sino que por el contrario, se compenetren entre sí mejorando las propiedades del aceite.

Por último, la estabilidad se requiere en los aditivos para obtener de los aceites las mismas propiedades aún cuando varíen las condiciones de temperatura, sin peligro de descomposición.

**2.11.3 Tipos de Aditivos en los Aceites Lubricantes.** Los aditivos presentes en los aceites se pueden clasificar en modificadores de las propiedades físicas, modificadores de las propiedades químicas y modificadores de las propiedades físico-químicas.

**2.11.4 Modificadores de las Propiedades Físicas.** Para modificar las propiedades físicas de los aceites existen aditivos que actúan sobre la viscosidad o sobre el punto de fluidez de los mismos.

Para mejorar el índice de viscosidad de los lubricantes, se utilizan polímeros de cadena larga, que a bajas temperaturas se enrollan sobre sí mismos permitiendo que la viscosidad disminuya y cuando la temperatura se incrementa se desenrollan y entrelazan, compensando así la pérdida de viscosidad.

Los depresores del punto de fluidez, como su nombre lo indica, se agregan a los aceites para descenderles el punto de fluidez, para que de esta manera puedan resistir su espesamiento a bajas temperaturas y se disminuya la formación de cristales de cera que interfieren en la fluidez del aceite.

**2.11.5 Modificadores de las Propiedades Químicas.** Entre los aditivos que se utilizan para mejorar las propiedades químicas de los aceites se encuentran los antioxidantes, los anticorrosivos y los antiherrumbre.

Los aditivos contra la oxidación se usan para que los aceites tengan una mayor resistencia a ella, tanto a altas como a bajas temperaturas. Esto se hace debido a que el proceso de oxidación da lugar a la formación de depósitos perjudiciales de lodos y barnices que tienden a aumentar la viscosidad del lubricante.

Los inhibidores contra la herrumbre y corrosión mejoran la habilidad de un aceite de adherirse a las superficies metálicas, ayudando de esta manera a evitar que penetre el agua y materias corrosivas dentro de la película lubricante que puedan atacar las piezas lubricadas.

**2.11.6 Modificadores de las Propiedades Físico-Químicas.** Los agentes usados en la modificación de las propiedades físico-químicas de los aceites son básicamente los aditivos detergentes y dispersantes, de untuosidad, de extrema presión y antiespumantes.

Los detergentes son agregados a los aceites para reducir la formación de burbujas de aire, de lodos y barnices y los dispersantes mantienen estas materias en suspensión dentro del aceite para evitar que se formen depósitos en las partes metálicas circundantes.

Los de mejoradores de la untuosidad tienen como finalidad hacer que el aceite se adhiera con más fuerza a las superficies metálicas. A éstos se les conoce también con el nombre de aditivos de adhesividad.

Los aditivos de extrema presión reaccionan químicamente en las superficies para dar una película protectora que reduce el contacto metal con metal, aún a muy altas presiones y temperaturas. Estos aditivos son usados frecuentemente en la fabricación de grasas y aceites para proporcionarles resistencia a soportar cargas máximas.

Los aditivos untuosos y de extrema presión se diferencian en que los primeros son usados en aceites para trabajar a bajas temperaturas, mientras que los segundos se le adicionan a aceites que trabajarán a altas temperaturas de funcionamiento.

Los agentes antiespumantes sirven para reunir y expulsar las perjudiciales burbujas de aire que frecuentemente se forman en los sistemas hidráulicos o circulantes.



### 3. APLICACIÓN DE LOS LUBRICANTES SEGÚN SUS PROPIEDADES

Según las propiedades, los lubricantes tienen su aplicación específica, esto con el fin de cumplir con los requerimientos técnicos de cada elemento a lubricar. De acuerdo con lo anterior, se pueden establecer tres grandes grupos a saber: Lubricantes industriales, para automatización y para grandes motores diesel.

#### 3.1 LUBRICANTES INDUSTRIALES

Este grupo de lubricantes debe cumplir con los requerimientos técnicos de las grandes maquinarias industriales, cuyas condiciones de operación son generalmente severas. Ejemplos de estos equipos son:

**3.1.1 Máquinas Herramientas.** Las principales características que deben presentar los lubricantes para este tipo de equipos son básicamente:

- Viscosidad adecuada en función del equipo.
- Estabilidad a la oxidación.
- No corrosivo.
- Propiedades antiespuma.
- Propiedades antiherrumbre.
- Buenas propiedades de extrema presión (EP).
- Buenas propiedades de adherencia y untuosidad.

### **3.1.2 Reductores y Engranajes Industriales.**

- Viscosidad adecuada en función de la temperatura ambiente
- Estabilidad a la oxidación
- No corrosivo al bronce
- Buena demulsibilidad

### **3.1.3 Cojinetes.**

- Grado de viscosidad según dimensión, velocidad, carga y temperatura.
- Estabilidad a la oxidación
- Baja tendencia a formar depósitos
- Propiedades antiherrumbre
- Bajo punto de congelación

### **3.1.4 Equipos Hidráulicos.**

- Viscosidad adecuada para asegurar fluidez en la transmisión de energía
- Alto índice de viscosidad
- Baja compresibilidad
- Estabilidad a la oxidación a alta temperatura
- aditivos antiherrumbre
- Alta demulsibilidad
- Alta aeroemulsión (facilidad de eliminar el aire)
- Buen comportamiento con sellos y juntas

### **3.1.5 Compresores.**

- Viscosidad adecuada en función de la potencia

- Baja tendencia a formar depósitos
- Alta estabilidad a la temperatura máxima del aire

### **3.1.6 Turbinas.**

- Generalmente baja viscosidad por las altas velocidades a la que estará sometido
- Alta resistencia a la oxidación y formación de lodos
- Buenas propiedades antiespuma
- No corrosivo

## **3.2 LUBRICANTES PARA AUTOMOCIÓN**

Este grupo incluye principalmente los motores diesel y a gasolina.

### **3.2.1 Motores Diesel o a Gasolina.**

- Viscosidad adecuada
- Buen comportamiento a bajas temperaturas
- No formar lodos
- Estabilidad a la oxidación
- No corrosivo

### **3.2.2 Grandes Motores Diesel.**

- Viscosidad adecuada
- Estabilidad a la oxidación
- Baja volatilidad
- Propiedades antidesgaste

- Baja formación de carbón que permita mantener limpias las lumbreras
- Buena demulsibilidad

Tal como puede observarse en cada uno de los grupos anteriormente anotados, cada aplicación requiere de unas propiedades muy particulares en el lubricante, lo que hace de estos no intercambiables, ni permite que en un momento dado puedan mezclarse ya que las características de uno de los lubricantes puede anularse en presencia de otro lubricante por reacción de los aditivos de cada uno.

## 4. LA VISCOSIDAD Y SU CÁLCULO

### 4.1 VISCOSIDAD EN LÍQUIDOS Y GASES

**4.1.1 Viscosidad en Gases.** Las viscosidades de los gases aumentan con la temperatura en contraste con la de los líquidos, y el número de Reynolds es correspondientemente mayor aun cuando la masa-velocidad sea menor.

Para determinar la viscosidad de un gas utilizando la figura 10. Se buscan los valores de X y Y en el cuadro 12. Con dichos valores ubique el punto de intersección; con este punto y con el correspondiente al valor de temperatura, al cual se desee determinar la viscosidad, que se encuentra ubicado en la parte izquierda de la gráfica, se traza una línea recta que corte el eje de las viscosidades. El punto donde la recta dicho eje, corresponde al valor de la viscosidad del gas.

**4.1.2 Viscosidad en líquidos.** Para la mayoría de los líquidos, una gráfica viscosidad - temperatura en papel logarítmico es esencialmente una línea recta; la figura 11 ha sido construida partiendo de este hecho. Las desviaciones de los datos hallados mediante esta carta no exceden de 10%, salvo en los valores extremos de temperatura. Al igual que para los gases, y siguiendo el mismo procedimiento, pero utilizando el cuadro 13 y la figura 11 se puede determinar la viscosidad para diferentes líquidos.

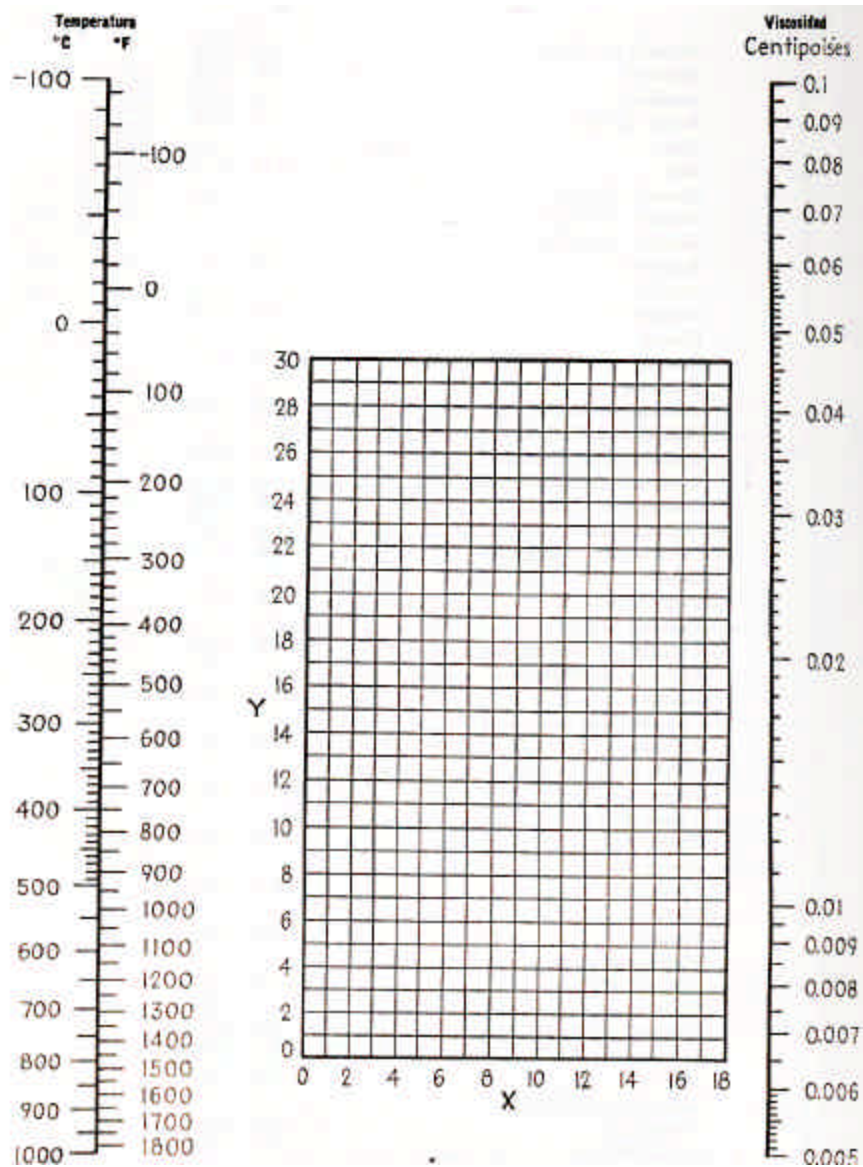


Figura 10. Viscosidades de gases.

Cuadro 12. Viscosidades de gases.

Gas	X	Y
Acetato de Etilo	8.5	13.2
Acetona	8.9	13.0
Acetileno	9.8	14.9
Acido Acético	7.7	14.3
Agua	8.0	16.0
Aire	11.0	20.0
Alcohol Etilico	9.2	14.2
Alcohol Metilico	8.5	15.6
Alcohol Propilico	8.4	13.4
Amoniaco	8.4	16.0
Argón	10.5	22.4
Benceno	8.5	13.2
Bromo	8.9	19.2
Buteno	9.2	13.7
Butileno	8.9	13.0
Bióxido de Azufre	9.6	17.0
Bióxido de Carbono	9.5	18.7
Bisulfuro de Carbono	8.0	16.0
Bromuro de Hidrógeno	8.8	20.9
Cianógeno	9.2	15.2
Ciclohexano	9.2	12.0
Cianuro de Hidrógeno	9.8	14.9
Cloro	9.0	18.4
Cloroformo	8.9	15.7
Cloruro de Etilo	8.5	15.6
Cloruro de Hidrógeno	8.8	18.7
Cloruro de Nitrosilo	8.0	17.6
Etano	9.1	14.5
Eter Etilico	8.9	13.0
Etileno	9.5	15.1
Flúor	7.3	23.8
Freon 11	10.6	15.1
Freon 12	11.1	16.0
Freon 21	10.8	15.3
Freon 22	10.1	17.0
Freon 113	11.3	14.0
Helio	10.9	20.5
Hexano	8.6	11.8
Hidrógeno	11.2	12.4
$3H_2 + 1N_2$	11.2	17.2
Yodo	9.0	18.4
Yoduro de Hidrógeno	9.0	21.3
Mercurio	5.3	22.9
Metano	9.9	15.5
Monóxido de Carbono	11.0	20.0
Nitrógeno	10.6	20.0
Oxido Nítrico	10.9	20.5
Oxido Nitroso	8.8	19.0
Oxígeno	11.0	21.3
Pentano	7.0	12.8
Propano	9.7	12.9
Propileno	9.0	13.8
Sulfuro de Hidrógeno	8.6	18.0
Tolueno	8.6	12.4
2, 3, 3-Trimetilbutano	9.5	10.5
Xenón	9.3	23.0



Cuadro 13. Viscosidades de líquidos

VISCOSIDADES DE LIQUIDOS*					
Para usarse como Coordenadas con la Fig. 14					
Líquido	X	Y	Líquido	X	Y
Acetaldehído	15.2	4.8	Cloruro Estánico	13.5	12.8
Acetato de Amilo	11.8	12.5	Cresol, meta	2.5	20.8
Acetato de Butilo	12.3	11.0	Dibromoetano	12.7	15.8
Acetato de Etilo	13.7	9.1	Dicloroetano	13.2	12.2
Acetato de Metilo	14.2	8.2	Diclorometano	14.6	8.9
Acetato de Vinilo	14.0	8.8	Difenilo	12.0	18.3
Acetona 100%	14.5	7.2	Eter Etilico	14.5	5.3
Acetona 35%	7.9	15.0	Etilbenceno	13.2	11.5
Agua	10.2	13.0	Etilenglicol	6.0	23.6
Acido Acético 100%	12.1	14.2	Fenol	6.9	20.8
Acido Acético 70%	9.5	17.0	Formiato de Etilo	14.2	8.4
Acido Butírico	12.1	15.3	Freon 11	14.4	9.0
Acido Clorosulfónico	11.2	18.1	Freon 12	16.8	5.6
Acido Fórmico	10.7	15.8	Freon 21	15.7	7.5
Acido Isobutírico	12.2	14.4	Freon 22	17.2	4.7
Acido Nítrico 95%	12.8	13.8	Freon 113	12.5	11.4
Acido Nítrico 60%	10.8	17.0	Freon 114	14.6	8.3
Acido Propiónico	12.8	13.8	Glicerina 100%	2.0	30.0
Acido Sulfúrico 110%	7.2	27.4	Glicerina 50%	6.9	19.6
Acido Sulfúrico 98%	7.0	24.8	Heptano	14.1	8.4
Acido Sulfúrico 60%	10.2	21.3	Hexano	14.7	7.0
Alcohol Alílico	10.2	14.3	Hidróxido de Sodio 50%	3.2	25.8
Alcohol Amílico	7.5	18.4	Yoduro de Etilo	14.7	10.3
Alcohol Butílico	8.6	17.2	Yoduro de Propilo	14.1	11.6
Alcohol Etilico 100%	10.5	13.8	Isobutano	14.5	3.7
Alcohol Etilico 95%	9.8	14.3	Mercurio	18.4	16.4
Alcohol Etilico 40%	6.5	16.6	Metanol 100%	12.4	10.5
Acido Clorhídrico 31.5%	13.0	16.6	Metanol 90%	12.3	11.8
Alcohol Isobutílico	7.1	18.0	Metanol 40%	7.8	15.5
Alcohol Isopropílico	8.2	16.0	Metiltilcetona	13.9	8.6
Alcohol Octílico	6.2	21.1	Naftaleno	7.9	18.1
Alcohol Propílico	9.1	16.5	Nitrobenceno	10.6	16.2
Amoniaco 100%	12.6	2.0	Nitrotolueno	11.0	17.0
Amoniaco 26%	10.1	13.9	Octano	13.7	10.0
Anhidrido Acético	12.7	12.8	Oxalato de Dietilo	11.0	16.4
Anilina	8.1	18.7	Oxalato de Dimetilo	12.3	15.8
Anisol	12.3	13.5	Oxalato de Dipropilo	10.3	17.7
Benceno	12.5	10.9	Pentacloroetano	10.9	17.3
Bióxido de Azufre	15.2	7.1	Pentano	14.9	5.2
Bióxido de Carbono	11.6	0.3	Propano	15.3	1.0
Bisulfuro de Carbono	16.1	7.5	Salmuera CaCl <sub>2</sub> 25%	6.6	15.9
Bromo	14.2	13.2	Salmuera NaCl 25%	10.2	16.6
Bromotolueno	20.0	15.9	Sodio	16.4	13.9
Bromuro de Etilo	14.5	8.1	Tetracloroetano	11.9	15.7
Bromuro de Propilo	14.5	9.6	Tetracloroetileno	14.2	12.7
n-Butano	15.3	3.3	Tetracloruro de Carbono	12.7	13.1
Ciclohexanol	2.9	24.3	Tetracloruro de Titanio	14.4	12.3
Clorobenceno	12.3	12.4	Tribromuro de Fósforo	13.8	16.7
Cloroformo	14.4	10.2	Tricloruro de Arsénico	13.9	14.5
Clorotolueno, orto	13.0	13.3	Tricloruro de Fósforo	16.2	10.9
Clorotolueno, meta	13.3	12.5	Tricloroetileno	14.8	10.5
Clorotolueno, para	13.3	12.5	Tolueno	13.7	10.4
Cloruro de Etilo	14.8	6.0	Turpentina	11.5	14.9
Cloruro de Metilo	15.0	3.8	Xileno, orto	13.5	12.1
Cloruro de Propilo	14.4	7.5	Xileno, meta	13.9	12.1
Cloruro de Sulfurilo	15.2	12.4	Xileno, para	13.9	10.9



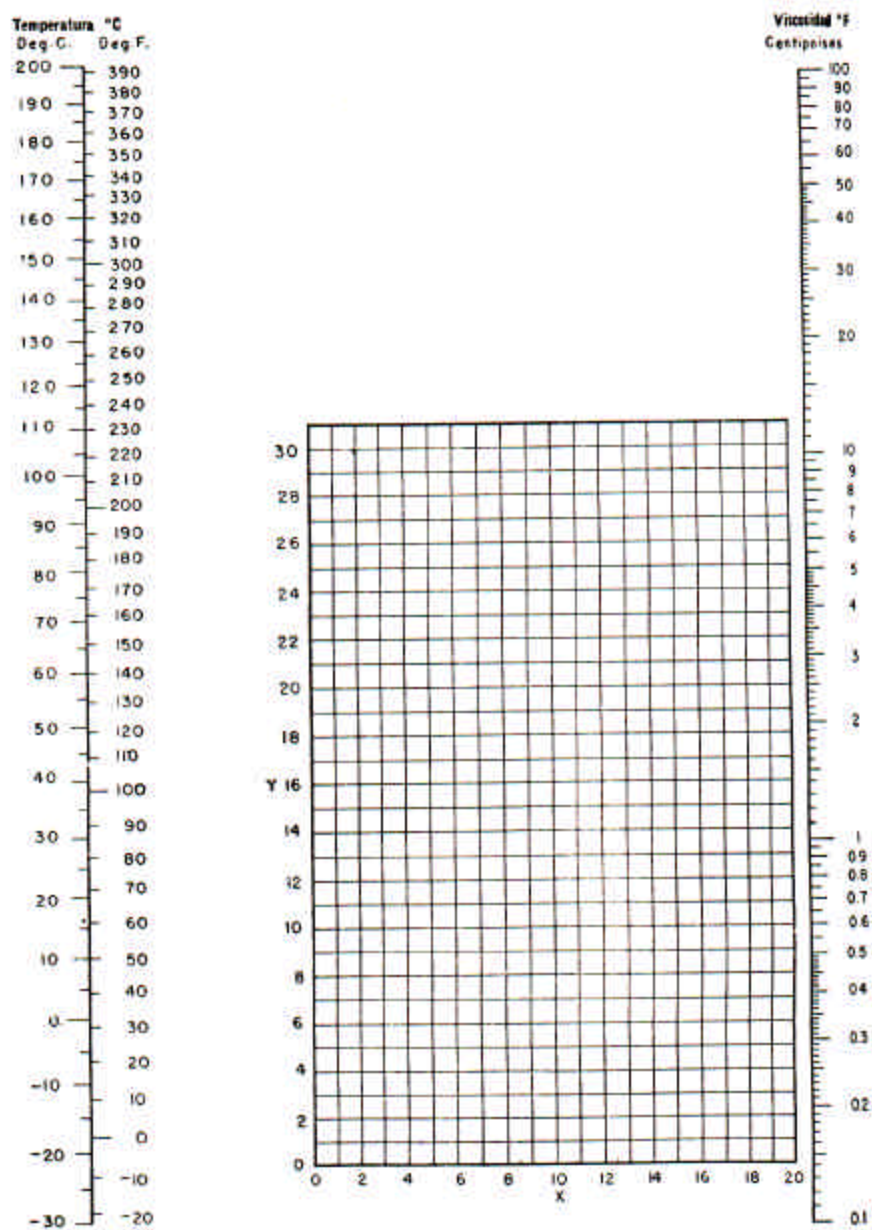


Figura 11. Viscosidades de líquidos

## 4.2 FACTORES QUE AFECTAN LA VISCOSIDAD

**4.2.1 Temperatura.** La temperatura afecta en forma inversamente proporcional a la viscosidad. Cuando un aceite se calienta, su viscosidad disminuye y cuando se enfría el aceite se espesa hasta un punto tal que ya no fluye. Por esto, al seleccionar un lubricante, se debe tener en cuenta la temperatura ambiente o de funcionamiento del mecanismo, de tal forma que si va a operar en un sitio demasiado caluroso se utilice aceite de una viscosidad mayor no obstante la velocidad sea alta y la carga ligera.

Por el contrario, si el ambiente es muy frío, se debe utilizar un aceite de baja viscosidad así la velocidad sea relativamente ligera y la carga pesada, ya que la baja temperatura ambiente se encargará de disipar el calor y darle el aumento de viscosidad necesario para soportar las otras condiciones de trabajo.

La temperatura de funcionamiento de un elemento también se puede ver aumentada por la proximidad de una fuente de calor, por la viscosidad del lubricante, mal montaje del mecanismo o por un diseño defectuoso.

Cuando un elemento trabaja en lugares donde hay fluctuaciones de temperatura, se deben utilizar lubricantes con altos índices de viscosidad que permitan una mayor estabilidad de la misma.

Siempre deberá existir una adecuada relación entre los factores de velocidad, carga y temperatura para que se pueda elegir correctamente la viscosidad del aceite en cada caso particular.

**4.2.2 Velocidad.** Cuando la velocidad relativa de las superficies en movimiento es elevada se debe utilizar un aceite de baja viscosidad que permita fácilmente la acción de bombeo y la formación de cuña de aceite. Si la velocidad es baja se debe compensar la deficiencia en la formación de la cuña de aceite con un aceite

grueso (alta viscosidad). Este, aunque no forma completamente la cuña, evita el contacto metálico debido a que presenta mayor resistencia a ser comprimido y desalojado.

Los juegos o tolerancias entre las superficies vienen en la relación inversa con la velocidad de tal forma que si la velocidad es alta el juego sea pequeño y suficiente para que el aceite que se va a utilizar forme una película adecuada y resistente. Si estos juegos o tolerancias fueran demasiado grandes, la cuña no alcanzaría a formarse, no obstante la velocidad, ya que los fluidos tienden a circular hacia los puntos que menor resistencia ofrezcan, permitiendo así el contacto metálico con el aumento de la fricción y desgaste. Por el contrario, un juego demasiado pequeño impide la circulación del lubricante a través de toda la superficie.

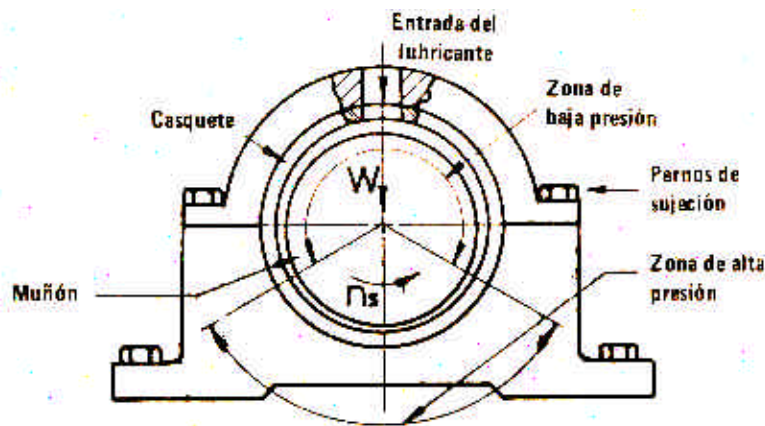
La fricción interna del fluido (fricción fluida) es directamente proporcional a la velocidad, creciendo el valor cuando aumenta la velocidad y viceversa.

Cuando la lubricación es con grasa, en situaciones de alta velocidad se deben utilizar grasa de bases lubricantes ligeras y cuando las velocidades sean bajas, bases lubricantes pesadas.

**4.2.3 Carga.** Cuando sobre dos superficies que están en contacto actúa una pesada carga y la viscosidad de la película lubricante es baja, los cuerpos tienden a tocarse y la película de aceite a desplazarse por compresión hacia los lados, originando el contacto metálico entre las superficies. Una mayor viscosidad soportará mejor la acción compresión que esa pesada carga ejerce.

Cuando la carga es liviana un aceite delgado será suficiente para separar completamente las dos superficies y permitir el libre movimiento de las partes con un mínimo de pérdida de potencia por fricción fluida. Cuando la carga aplicada es aproximadamente igual a la resistencia de la película, la carga tenderá a sobrepasar la película de aceite y originará el contacto metálico; por lo tanto se debe utilizar un aceite cuya viscosidad garantice una resistencia de película mayor

que la presión ejercida por la carga aplicada. El lubricante se debe aplicar por la zona de baja presión como se muestra en la figura 12, ya que es la que menos resistencia ofrece. Si se aplicara en la zona de mayor carga, se necesitaría inicialmente una presión adicional para vencer el peso del elemento. (lubricación hidrostática).



**Figura 12. El lubricante se debe aplicar en la zona de baja presión**

**4.2.4 Polvo y Suciedad.** Estos elementos se pueden introducir de diferentes formas al lubricante, así:

- Se puede iniciar en la bodega de almacenamiento del lubricante sino está bajo buenas condiciones de limpieza y, aún, si los envases se dejan destapados o los sellos están en mal estado.
- Cuando los recipientes en donde se va a transportar el aceite de la caneca a la máquina están sucios o no tiene tapas.
- Cuando por falta de mantenimiento y limpieza la máquina tiene capas de polvo sobre las partes a lubricar.

- Cuando los dispositivos a utilizar en la lubricación tales como aceiteras o graseras se encuentran en mal estado y no se limpian frecuentemente.
- En el aire, y sino se limpian los filtros de aire y de aceite.

**4.2.5 Agua.** La humedad es perjudicial para el lubricante y para la superficie metálica. Un buen lubricante debe poseer buenas cualidades antiemulsionantes con el fin de que se separe rápidamente del agua cuando se haya en presencia de ésta y/o cree una película protectora entre la superficie metálica y el medio circulante para evitar la corrosión.

El agua puede presentarse así:

- Cuando las máquinas dejan de funcionar y se enfrían, se produce la condensación de los vapores de agua presentes en la atmósfera.
- De serpentines de enfriamiento defectuosos que permiten fugas de agua y su paso posterior a los depósitos de aceite.
- Los tambores mal almacenados y a la intemperie, pueden transportar el agua almacenada en la tapa de la caneca hacia la superficie del aceite, debido al proceso de expansión y contracción del recipiente (respiración). Si esta agua no se drena o evacua rápidamente, causa el emulsionamiento del aceite a pesar de los aditivos antiemulsionantes que posea.

**4.2.6 Solventes.** Cuando se limpian los diversos mecanismos de una máquina pueden quedar películas superficiales de los solventes utilizados, que luego, al aplicar los lubricantes los adelgazan hasta tal grado que originan una lubricación de película límite.

Los solventes que se deben utilizar durante la limpieza deben ser altamente volátiles para que una vez realizada la operación de limpieza, la superficie quede completamente seca (no se debe utilizar en la limpieza ACPM, gasolina, kerosene o petróleo ya que producen películas persistentes y diluyen el lubricante, en caso de que no haya otra alternativa se deben limpiar posteriormente las piezas con aceite). Los recipientes utilizados para transportar los solventes no deben ser los mismos que para los lubricantes.

Actualmente existen en el mercado aceites de limpieza que se mezclan en pequeñas proporciones con un aceite delgado y limpian completamente las superficies. Este aceite de limpieza se puede volver a utilizar, sin embargo por su baja proporción en la mezcla (4 a 5% por volumen) no resulta económico en algunos casos particularmente en donde se requieran condiciones estrictas de limpieza.

Algunas veces se emplean también aceites delgados en la limpieza. Estos se aplican una vez que se ha extraído completamente el aceite usado.

#### **4.3 RELACIÓN ENTRE LA VISCOSIDAD Y LA TEMPERATURA**

La viscosidad es la característica más importante de un aceite y la variable que más la afecta es la temperatura. La viscosidad disminuye a medida que la temperatura aumenta, pero la magnitud en que varía la viscosidad depende tanto del incremento en la temperatura como de la naturaleza química del aceite y del tipo de aditivo que posea. Para seleccionar correctamente un lubricante que se ajuste a las condiciones de la temperatura de funcionamiento del elemento sin que se oxide rápidamente o se descomponga, es necesario conocer las características técnicas del lubricante y verificar que sus condiciones de funcionamiento a altas temperaturas sí sean las adecuadas. No se debe esperar que la temperatura de funcionamiento del mecanismo sea la que se acomode a la máxima temperatura que pueda soportar el lubricante sin descomponerse porque los paros de

maquinaria, piezas rotas y consumos de repuestos serían tan altos que el presupuesto asignado al departamento de mantenimiento durante el semestre solo alcanzaría para unos pocos días, además de que la producción bajaría vertiginosamente y no habría suficiente personal para arreglar y poner a funcionar de nuevo la maquinaria.

#### **4.4 DEFINICIÓN DE VISCOSÍMETRO**

Son instrumentos desarrollados para medir la viscosidad de los líquidos. Entre las características más importantes que presenta se tienen:

- Determinan el tiempo de flujo de un volumen dado de un líquido que fluye por gravedad o baja presión a través de un tubo corto o de un capilar.
- Determinan la velocidad de amortiguación de ondas ultrasónicas inducidas en el líquido.
- Determinan la caída de presión entre los extremos del tubo o del capilar.
- Determinan el tiempo que se demora en caer o recorrer el tubo (o el capilar), una bola estándar o un cilindro.
- Determinan el tiempo invertido por una burbuja de aire en recorrer a través del líquido, la distancia desde el fondo a la superficie del líquido.
- Determinan el momento de torsión de un disco que gira dentro del líquido que se halla alojado en una copa.
- Determinan el momento de torsión para mover un disco, un cilindro o una espátula en el líquido a una velocidad fija.

- Determinan la velocidad de rotación de un cilindro o de un disco accionado en el líquido por un momento de torsión constante conocido.

En el cuadro 14 se dan los principales viscosímetros empleados en lubricación para medir la viscosidad de los aceites.

En la práctica la viscosidad se determina por el tiempo que invierte un volumen dado de un líquido en salir de un viscosímetro determinado a través de un orificio calibrado y se expresa en las unidades del viscosímetro y en la temperatura a la cual se realizó la medición.

**Cuadro 14. Viscosímetros más comunes para determinar la viscosidad de los lubricantes**

VISCOSÍMETRO	UNIDADES	TEMPERATURA DE REFERENCIA	DETERMINACION	PAIS DONDE SE UTILIZA
SAYBOLT	SEGUNDOS	+100°F +130°F +210°F	Tiempo de escape de 60cm <sup>3</sup> del aceite	ESTADOS UNIDOS
REDWOOD No. 1	SEGUNDOS	+ 70°F +140°F +200°F	Tiempo de escape de 50cm <sup>3</sup> del aceite	INGLATERRA
ENGLER	GRADOS	+ 20°C + 38°C + 50°C +100°C	Tiempo de escape de 200 cm <sup>3</sup> del aceite, dividido entre el tiempo de escape de 200 cm <sup>3</sup> de agua a +20°C	EUROPA CONTINENTAL

Una costumbre muy difundida entre operarios y mecánicos es la pretender apreciar la viscosidad de los aceites lubricantes mediante el tacto, esta práctica conduce a muchos errores, ya que las impresiones de cada una de las personas que lo analicen de esta manera son subjetivas y no se tienen en cuenta factores tales como la temperatura de observación y la posibilidad de contaminar el aceite



con las partículas ya sean de polvo o metálicas que se tengan en los dedos. Uno de los peligros de esta práctica es que induce al uso de aceites excesivamente viscosos, por dar la impresión de una mayor resistencia de la película. Esta situación se presenta con mucha frecuencia en aceites para lubricación automotriz, principalmente cuando se quiere ver el estado del aceite del motor. Esta es una práctica no confiable y lo mejor, en estos casos, es controlar adecuadamente el kilometraje recorrido. Existe una creencia popular de que los lubricantes de calidad inferior pierden su viscosidad con el uso, siendo el fenómeno real completamente al revés. Las variaciones en la viscosidad se deben siempre a factores ajenos a la calidad intrínseca del aceite y una disminución en la viscosidad puede deberse a contaminación con combustible o con otros aceites de baja viscosidad. Si la viscosidad aumenta es posible que el aceite se halle oxidado.

Los aceites oscuros, en general parecen ser más viscosos, lo que puede dar lugar a errores. El color no da indicio alguno de la calidad, siendo opiniones particulares el que los aceites claros son mejores: el color de un aceite es característico de cada fabricante con el fin de distinguirlos de los de la competencia. Otro error frecuente es con los aceites para lubricación de motores de combustión interna. Cuando éstos se oscurecen casi recién aplicados, mucha gente piensa que el aceite se descompuso o es de una calidad muy baja, sin embargo es todo lo contrario ya que, cuando un aceite se oscurece rápidamente, significa que está realizando adecuadamente su trabajo de limpieza y posee buenos aditivos detergentes y dispersantes.

#### **4.5 TIPOS DE VISCOSÍMETROS**

Los viscosímetros se pueden clasificar de acuerdo a la forma en que determinan la viscosidad. Los más comunes son el viscosímetro de cilindros concéntricos, el Saybolt, el Redwood, el Engler y el Ostwald. Cada uno de ellos se reseñará a continuación.

**4.5.1 Viscosímetro de Cilindros Concéntricos.** También se le conocen con el nombre de viscosímetro de cilindros coaxiales, y consiste esencialmente en dos cilindros concéntricos separados entre sí para formar un espacio anular en el cual se introduce el fluido de prueba. Uno de los cilindros, el externo, gira, mientras el otro permanece estacionario, ejerciéndose una acción cortante en el fluido, la cual es transmitida al cilindro interno para reproducir su arrastre.

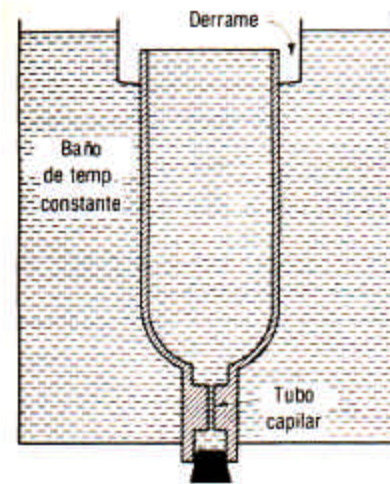
Para determinar la viscosidad con este viscosímetro, se mide la torsión necesaria para producir la rotación del cilindro estacionario con una velocidad angular dada.

**4.5.2 Viscosímetro Saybolt.** Este viscosímetro ha sido normalizado por la ASTM en formas apropiadas para aceites lubricantes y para el ensayo de aceites combustibles y de carretera.

Esencialmente está compuesto por un tubo de latón resistente a la corrosión, el cual tiene un vertedero de rebose para ajustar el nivel del líquido en la parte superior, una válvula en forma de tapón de corcho y un capilar corto de las dimensiones precisas en la parte inferior del tubo. Este va sumergido en un baño de aceite que le sirve de soporte para mantenerlo en forma vertical; el baño debe estar provisto de un agitador y de una fuente para calentar y enfriar el baño cuando sea necesario.

Los pasos a seguir para la determinación de la viscosidad con este aparato son los siguientes: Se llena el tubo con el líquido de ensayo y se espera hasta que se alcance un equilibrio térmico. Una vez alcanzado tal equilibrio debe retirarse el aceite en exceso del depósito para proceder a quitar el tapón del orificio para permitir el descenso del líquido midiéndose el tiempo en segundos necesario para recoger un volumen determinado, en este caso 60 ml del líquido en un recipiente colocado bajo el capilar.

No existe un máximo de viscosidad que no pueda ser medido en el viscosímetro Saybolt universal, pero en general se usa para líquidos que tengan un tiempo máximo de flujo de más de 100 segundos, es más práctico usar el viscosímetro Saybolt Furol, que difiere en el anterior solo en el tamaño del orificio de salida. (Ver figura 13).



**Figura 13. Viscosímetro de Saybolt**

**4.5.3 Viscosímetro Redwood.** El viscosímetro Redwood utiliza el mismo principio que el Saybolt para la determinación de la viscosidad de los aceites, es decir, mide la velocidad de flujo del aceite a través de un tubo corto o un orificio. Este viscosímetro se utiliza en Inglaterra y difiere del viscosímetro Saybolt en el volumen de líquido utilizado en la prueba. En el Redwood se utilizan 50 cm<sup>3</sup> de fluido en el ensayo y las temperaturas de referencia son 70°F -140°F.

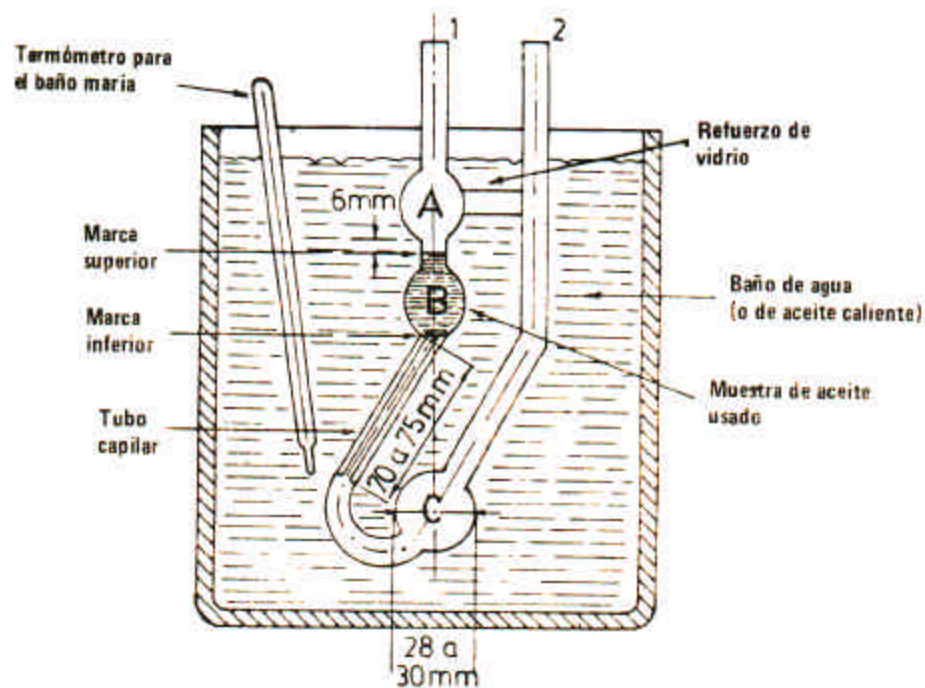
**4.5.4 Viscosímetro Engler.** El viscosímetro Engler es utilizado en Europa Continental, más exactamente en Alemania. La unidad utilizada para expresar la viscosidad con este viscosímetro son los grados Engler.

Para realizar la prueba se toman como temperatura de referencia 20°C, 38°C, 50°C y 100°C, y se mide el tiempo de escape de 200cm<sup>3</sup> de aceite y se compara con el tiempo de escape de igual volumen de agua a 20°C, cuya relación representa los grados Engler, o sea que:

$$\begin{aligned}\text{Grados Engler} &= \text{Tiempo de escurrimiento del aceite} \\ &= \text{Tiempo de escurrimiento del agua a } 20^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

**4.5.5 Viscosímetro Ostwald.** El viscosímetro Ostwald consiste en un sistema de tubos comunicantes de vidrio en forma de U, con tres depósitos; A, B y C, y un tubo capilar que conecta los depósitos B y C. El diámetro del tubo capilar depende de la viscosidad del aceite que se vaya a determinar con el fin de tener en cuenta la velocidad de descenso del aceite para que ésta no pase de cierto límite. En la figura 14 se muestra un esquema del equipo con sus características.

Para medir la viscosidad cinemática de la muestra de aceite usado, se invierte el viscosímetro y se sumerge el extremo 1 en el depósito de aceite; por el extremo 2 se succiona hasta llenar los depósitos A y B. Se invierte nuevamente el viscosímetro y se coloca dentro del baño de aceite o agua caliente que se encuentra a la temperatura de ensayo. Una vez invertido el viscosímetro, el aceite comienza a fluir hacia el depósito C; se espera a que el aceite de muestra alcance la temperatura de ensayo y se procede a succionar el aceite por el extremo 1, hasta alcanzar el nivel de 6 mm por encima de la marca superior que se encuentra encima del bulbo B. Se quita la succión y se mide el tiempo en segundos que tarda la muestra en descender desde la marca superior hasta la marca inferior del bulbo B. El tiempo gastado se multiplica por la constante del viscosímetro que depende del tamaño usado, para obtener la viscosidad cinemática del aceite.



**Figura 14. Viscosímetro de Ostwald**

#### 4.6 CONVERSION DE LAS UNIDADES DE LA VISCOSIDAD

De acuerdo al tipo de viscosímetro que se utilice para medir la viscosidad, ésta se expresará en las unidades usadas en cada uno de ellos. Se han desarrollado una serie de fórmulas prácticas que permiten pasar rápidamente de un sistema de medida a otro, pero existe una forma de hacerlo directamente que es por medio de la figura 15. Esta figura comprende las escalas de medida de la viscosidad en Centistokes, Segundos Saybolt Universal, Segundos Redwood N°1, Grados Engler, Segundos Saybolt Furol y Segundos Redwood N°2. Para pasar de un sistema a otro se ubica el valor de la viscosidad en la escala correspondiente y se traza una línea horizontal perpendicular a dicha escala hasta que corte la escala de la viscosidad en el sistema de unidades requerido. Es importante anotar que esta carta se utiliza cuando no se requiera gran exactitud en la conversión.

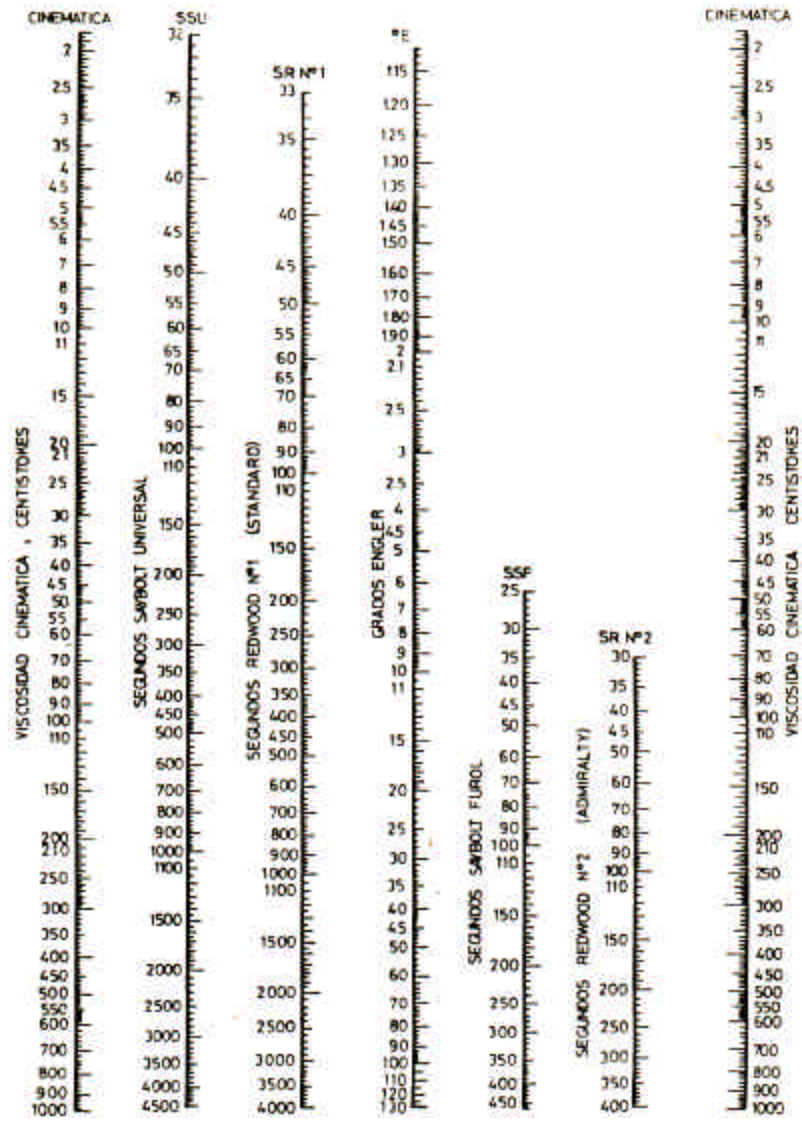


Figura 15. Carta de conversión de la viscosidad a cualquier temperatura

## 5. DISEÑO DEL VISCOSÍMETRO DE CILINDROS CONCÉNTRICOS

### 5.1 GENERALIDADES

Este tipo de viscosímetro consta principalmente de dos cilindros concéntricos o coaxiales separados por una fina capa anular donde se aloja el líquido en prueba. El cilindro externo gira por medio de un motor eléctrico mientras que el cilindro interno permanece en estado de reposo hasta que la resistencia viscosa del líquido se compensa por la torsión de un alambre. Cuando el cilindro se detiene puede realizarse una lectura con rapidez. Estableciendo la relación adecuada entre la viscosidad, la velocidad y el diámetro del alambre, puede obtenerse una desviación suficiente para hacer la lectura con una precisión media, sin que, por ello, se llegue a provocar un exceso de torsión que deforme el alambre permanentemente. Como el instrumento lleva varios alambres, puede emplearse para estudiar una gama muy amplia de sustancias viscosas. Con líquidos lo suficientemente viscosos para que no se registre turbulencia, la torsión del alambre es proporcional a la velocidad y los resultados se comprueban recurriendo a una variación de esta última. Los efectos terminales se eliminan o reducen mediante una burbuja de aire, que se encuentra aprisionada debajo del cilindro. El alambre de torsión va provisto de un disco graduado dividido en 300 partes iguales, que se designan con el nombre de grados MacMichael<sup>2</sup>. Las desviaciones menores pueden medirse también recurriendo al método del espejo y la escala, convirtiéndolos, después, en grados MacMichael.

---

<sup>2</sup> FULLER, Dudley. Teoría y Práctica de la Lubricación. Madrid: Taller Gráfico CIES, 1961. 11p.

Este equipo es muy útil para encontrar la viscosidad de fluidos newtonianos a distintas velocidades y temperaturas, a diferencia de los otros viscosímetros, que determinan la viscosidad con base en el tiempo de flujo que tarda un volumen normalizado de fluido en descender por gravedad a través de un orificio calibrado.

## 5.2 PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO

El diseño del viscosímetro de cilindros concéntricos con funcionamiento didáctico, toma como principio fundamental la ley de viscosidad de Newton para fluidos newtonianos<sup>3</sup>.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

Newton aseguró que los fluidos tienen una propiedad que se asemeja al rozamiento entre dos superficies sólidas. Esta propiedad es un frotamiento interno, o, en otros términos, se necesita una fuerza para cizallar una película líquida. Newton describe sus experiencias básicas realizadas con “dos cilindros concéntricos sumergidos en agua profunda y tranquila”. La diferencia de los radios de estos cilindros era pequeña y equivalía al espesor de la película del fluido.

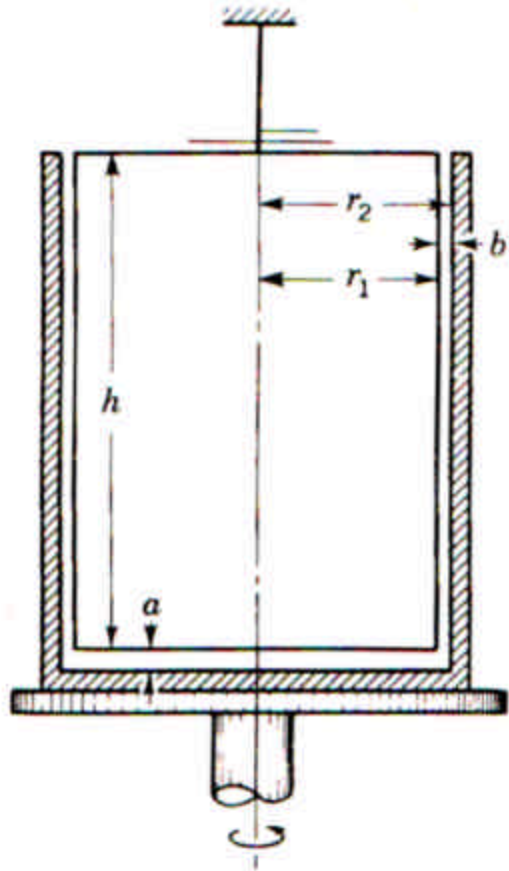
Además, para que se presente un flujo laminar entre los dos cilindros, debe cumplirse que el juego lateral entre ellos sea mucho menor que el radio del cilindro interior ( $b \ll r$ ). Debido a esto se tomaron las siguientes dimensiones, como se muestra en la figura 16:

---

<sup>3</sup> STREETER, Víctor. Mecánica de los Fluidos, 8ed. México: Mc Graw-Hill, 1994. 9p.



- $r_1 = 64mm.$  (radio del cilindro interno)  
 $r_2 = 66mm.$  (radio interno del cilindro exterior)  
 $b = 2mm.$  (juego lateral de los cilindros)  
 $h = 140mm.$  (altura del fluido)  
 $a = 2mm.$  (holgura en la base de los cilindros)



**Figura 16. Dimensiones del Viscosímetro**

### 5.3 ECUACIONES PARA LA EVALUACIÓN DEL PAR DE FROTAMIENTO

En el viscosímetro de cilindros concéntricos se presenta un par de torsión en la parte lateral del cilindro interno ejercido por el cilindro externo, y otro en la superficie inferior del cilindro interno.

En primer lugar, se analizará el torque en la parte lateral del cilindro interno:

Partiendo de la ecuación de Newton (1), donde:

$$u = \frac{2pr_2N}{60}$$

tenemos:

$$\frac{du}{dy} = \frac{2pr_2N}{60b} \quad (2)$$

Siendo  $b$  la separación de los cilindros.

Remplazando en la ecuación (1)

$$t = \frac{m2pr_2N}{60b} \quad (3)$$

como sabemos:

$$t = \frac{F}{A} = \frac{m2pr_2N}{60b}, \text{ donde } A = 2pr_1h$$

Despejando  $F$  tenemos:

$$F = \frac{(2pr_1h)(m2pr_2N)}{60b}$$

$$F = m^2 \frac{r_1^2 r_2 Nh}{15b} \quad (4)$$

Por lo tanto, el torque en el lado del cilindro es:

$$T_c = Fr_1$$

$$T_c = \frac{m^2 r_1^2 r_2 Nh}{15b} \quad (5)$$

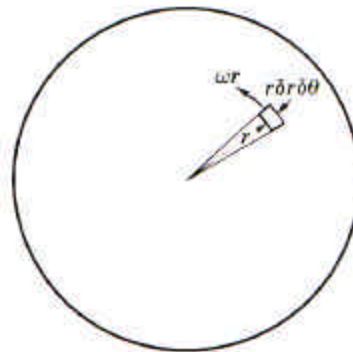
Sustituyendo las dimensiones del viscosímetro tenemos:

$$T_C = 12184366.15 mN \quad (6)$$

donde  $m$  debe estar en  $\frac{kgf.-seg.}{mm^2}$ , y  $N$  en r.p.m. para que  $T_C$  esté en  $kgf.-mm$

Seguidamente, se determinará el torque en la base del cilindro interno:

Haciendo referencia a la figura 17.



**Figura 17. Representación del fondo del cilindro interno**

$$dT = r t dA = r m \frac{\omega r}{a} r dr d\theta$$

En donde el cambio de velocidad en la distancia  $a$  es  $\omega r$ . Al integrar sobre el

área del disco y si  $w = \frac{2pN}{60}$

$$T_d = \frac{mpN}{30a} \int_0^{r_1} \int_0^{2\pi} r^3 dr d\theta$$

Resolviendo la integral se obtiene:

$$T_d = \frac{m p^2 N r_1^4}{60a} \quad (7)$$

Remplazando las dimensiones del viscosímetro en (7)

$$T_d = 1379870.71 mN \quad (8)$$

Ahora, el momento de torsión debido al cilindro y al disco debe ser igual al momento de torsión  $T$  en el alambre, así que:

$$T = T_c + T_d = \frac{m p^2 r_1^2 r_2 N h}{15b} + \frac{m p^2 N r_1^4}{60a} = 13564236.86 mN \quad (9)$$

Despejando la viscosidad  $m$ ,

$$m = \frac{7.37 * 10^{-8} T}{N} \quad (10)$$

Donde  $N$  se mide con un tacómetro y  $T$  se halla de acuerdo al alambre de torsión ya calibrado.

#### 5.4 SELECCIÓN DEL ALAMBRE DE TORSIÓN

Para seleccionar el alambre de torsión, se necesita emplear sustancia bastante viscosa, por lo que se empleará la Glicerina a una velocidad de 500 r.p.m. (asumida). La viscosidad de la Glicerina es:

$$m = 6.4 * 10^{-8} \text{ kgf-s/mm}^2$$

Remplazando en la ecuación (9):

$$T_{max} = 434 \text{ kgf-mm}$$

Por Resistencia de Materiales <sup>4</sup>

$$t_{max} = \frac{16T_{max}}{pd^3} \quad (11)$$

Por la Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo<sup>5</sup>:

$$t_{max} \leq \frac{S_y}{2} \quad (12)$$

Tomamos un alambre de Acero Galvanizado con las siguientes propiedades:

$$S_y = 32 \text{ kgf/mm}^2$$

$$G = 423 \text{ kgf/mm}^2$$

Remplazando (11) en (12):

$$\frac{S_y}{2} \geq \frac{16T_{max}}{pd^3} \quad (13)$$

Despejando de la ecuación (13):

$$d = \sqrt[3]{\frac{(32)(434)}{p(32)}} \Rightarrow d \geq 5.17 \text{ mm}$$

Diámetros iguales o mayores a éste, son recomendables para líquidos de alta viscosidad, pero no son apropiados para sustancias bastante ligeras; por lo tanto, se deben emplear alambres de menor diámetro, teniendo en cuenta que el momento de torsión es directamente proporcional con el número de revoluciones

<sup>4</sup> SINGER, Ferdinand. Resistencia de Materiales, 4ed. México: Harla, 1982. 64p

<sup>5</sup> SHIGLEY, Joseph. Diseño en Ingeniería Mecánica, 5ed. México: Mc Graw-Hill, 1980. 282p.

(r.p.m.), lo cual permite variar las r.p.m. sin que el ángulo de deformación del alambre sobrepase el permisible.

Tomando un alambre de menor diámetro,  $d = 2.4\text{mm}$ , se calcula el máximo momento permisible:

De la ecuación (13):

$$T_{max} = \frac{(32)(p)(2.4^3)}{32} = 44 \text{ kgf-mm}$$

Despejando de la ecuación (10):

$$N_{max} = \frac{(7.37 * 10^{-8})(T_{max})}{m}$$

Para la Glicerina:

$$N_{max} = \frac{(7.37 * 10^{-8})(44)}{6.4 * 10^{-8}} = 51 \text{ r.p.m.}$$

El ángulo de deformación permisible<sup>6</sup> para el alambre de éste diámetro será:

$$q = \frac{T_{max} L}{JG} = \frac{32T_{max} L}{pd^4 G} = \frac{(32)(44)(350)}{p(2.4^4)(423)} \quad (14)$$

$$q = 11.2 \text{ rad} = 642^\circ$$

Debido a que la escala de deformación del alambre está dividida en grados MacMichael (300 grados), éstos equivalen a  $q = 535^\circ$

---

<sup>6</sup> SINGER, Op.cit. 63p.

## 5.5 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DEL MOTOR

Para la determinación de la potencia mínima que debería suministrar el motor, se tomaron los valores de  $T_{max}$  y  $N_{max}$  de la glicerina, por ser una sustancia bastante viscosa, por lo tanto, tenemos:

$$P = \frac{2p}{60} TN \quad (15)$$

Donde,

$P$ : [W]

$T$ : [N\*m]

$N$ : [rpm]

$$P = \frac{(0.44N * m)(51rpm)(2p)}{60}$$

$$P=2.3 W$$

En síntesis, cuando se empleen alambres de diámetro mayor a diferentes velocidades para sustancias altamente viscosas, se necesitará entonces un motor de mayor potencia.

## 5.6 VOLUMEN DEL FLUIDO EN PRUEBA

Para el cálculo del fluido en prueba es necesario remitirnos a la figura 16. Por lo tanto,

$$V = pr_2^2(h+a) - pr_1^2h \quad (16)$$

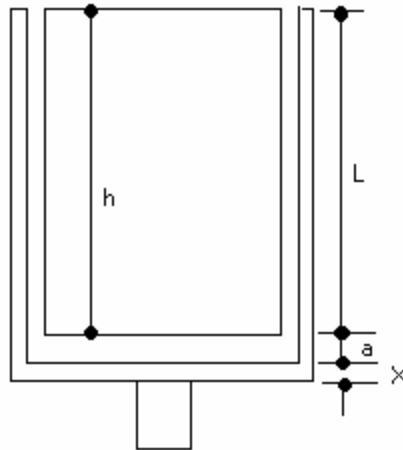
donde:

$$V = p(66^2)(140+2) - p(64^2)(140)$$

$$V=141723.53 \text{ mm}^3 @ 142 \text{ cm}^3$$

## 5.7 RESISTENCIA ELECTRICA

Para el cálculo de la potencia de la resistencia eléctrica que garantice la temperatura máxima deseada ( $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) se tendrá en cuenta las condiciones de diseño de los cilindros, así:



**Figura 18. Diagrama para el cálculo de la resistencia eléctrica.**

Primeramente para hallar el calor que deberá disipar la resistencia eléctrica debemos tener en cuenta el calor para calentar el cilindro externo y el fluido.

➤ Calor para calentar el cilindro externo:

$$Q = \frac{mc_p \Delta T}{t} \quad (17)$$

De acuerdo a la rapidez con que se quiera calentar el cilindro así se requerirá mayor o menor potencia para la resistencia.

El volumen del cilindro externo a calentar es:

$$V = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) L + \frac{\pi}{4} D_e^2 X$$



Datos:

$$D_e = 152\text{mm}$$

$$D_i = 132\text{mm}$$

$$L = 145\text{mm}$$

$$X = 16\text{mm}$$

reemplazando:

$$V = 937187.35\text{mm}^3$$

Propiedades del aluminio:

$$r = 2707\text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 0.896 * 10^3\text{ J/kg }^\circ\text{K}$$

Ahora:

$$m = r V \quad (18)$$

Reemplazando,

$$m = 2.54\text{ kg}$$

Se estimará un tiempo de 5 minutos para la estabilización del calentamiento del cilindro.

Reemplazando en la ecuación (17):

$$Q = 835\text{W}$$

➤ **Calor para calentar el fluido:**

Se tomó un líquido altamente viscoso como la Glicerina a 100%, que servirá de parámetro para asegurar un calentamiento a líquidos de menor viscosidad.

La masa del líquido a calentar es aquella que se encuentra alojada en el espacio anular y en la base entre los dos cilindros.

De acuerdo a la figura 18 el volumen del líquido a calentar es:

$$V = \pi r_2^2 (h + a) - \pi r_1^2 h$$

$$V = 141723.53 \text{ mm}^3 @ 142 \text{ cm}^3$$

Propiedades de la Glicerina<sup>7</sup>:

$$\rho = 1258.09 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 2.445 \cdot 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$$

De la ecuación (18):

$$m = 0.175 \text{ kg}$$

Para el calentamiento y estabilización de la Glicerina se tomaron 3 minutos adicionales a los 5 minutos empleados en el calentamiento del cilindro externo. La Glicerina se llevará a una temperatura de 120°C.

Remplazando en la ecuación (17), tenemos:

$$\mathbf{Q = 81W}$$

---

<sup>7</sup> KARLEKAR, B.V. y DESMOND, R.M. Transferencia de Calor, 2ed. México: Mc Graw-Hill, 1994.770p.

➤ **Calor disipado a través del cilindro interno:**

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum R} \quad (19)$$

donde:

$$\Delta T = T_f - T_{aire-interno}$$

$$T_f = 120^\circ C \text{ (Temperatura del fluido)}$$

$$T_{aire-interno} = 30^\circ C$$

Donde:

$$\sum R = R_{fluido} + R_{cilindro} + R_{aire} \quad (20)$$

Asumiendo el cilindro interno como una placa plana.

◆ Resistencia del fluido:

$$R_{fluido} = \frac{1}{hA} \quad (21)$$

donde  $h$  se determina de la siguiente forma<sup>8</sup>:

$$h = \frac{0.662 * R_e^{1/2} * P_r^{1/3} * k}{L} \quad (22)$$

Para la Glicerina a:

---

<sup>8</sup> Ibid.,515p.

$$T_{prom.} = \frac{(T_w + T_a)}{2} = \frac{(120 + 30)}{2} = 75^\circ C$$

$$u = 0.00015 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 1.63 \cdot 10^3$$

$$C_p = 2.583 \cdot 10^3 \text{ J/kg } ^\circ K$$

$$r = 1244.96 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 0.287 \text{ W/m } ^\circ K$$

$$L = 2pr = 0.40 \text{ m}$$

$$A = H * L = 0.149 * 0.40 = 0.06 \text{ m}^2$$

Ahora:

$$R_e = \frac{uD_e}{u} \quad (23)$$

donde:

$$D_e = \text{diámetro equivalente} = 4r_h = \frac{4p(d_2^2 - d_1^2)}{4pd_1} = \frac{d_2^2 - d_1^2}{d_1}, \text{ en m.}$$

$u$  = viscosidad cinemática de la glicerina, en  $\text{m}^2/\text{s}$

$u$  = velocidad del fluido, en  $\text{m/s}$

La velocidad se toma dentro del rango de prueba del equipo, además que cumplan con las condiciones de prueba, la cual esta definida por  $N$ .

Tomamos una velocidad de  $N = 500 \text{ rev/min} = 3.45 \text{ m/s}$

$$R_e = \frac{3.45 * 0.008125}{0.00015} = 186.875$$

Se puede observar que este valor se encuentra dentro de los parámetros para

flujo laminar.

Sustituyendo los valores en la ecuación (22):

$$h = 308 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$$

reemplazando en (21):

$$R_{\text{fluido}} = 0.054 \text{ }^\circ\text{K/W}$$

◆ Para el cálculo de la resistencia del cilindro, tenemos:

$$R_{\text{cilindro}} = \frac{L}{kA} \quad (24)$$

Donde.

$L$  = espesor de la placa plana, en m

$k$  = conductividad térmica del aluminio, en  $\text{W/m}^\circ\text{C}$

$A$  = área de la pared normal al flujo de calor, en  $\text{m}^2$

reemplazando en (24):

$$R_{\text{cilindro}} = \frac{0.01}{204 * 0.06} = 0.00082 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

◆ Resistencia del aire (convección libre)<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Ibid.,621p.

$$R_{aire} = \frac{L}{kA} \quad (25)$$

Donde,

$$h = \frac{N_u k}{L} \quad (26)$$

$$N_u = 0.59 R_a^{0.25} \quad \text{para } 10^4 < R_a < 10^9 \quad (27)$$

$$R_a = Gr Pr \quad (28)$$

$R_a$  : Número de Rayleigh

$Gr$ : Número de Grashof

Ahora,

$$Gr = \frac{g b \Delta T L_C^3}{u^2} \quad (29)$$

Donde:

$g$  = aceleración gravitacional

$b$  = coeficiente de expansión térmica

$\Delta T$  = diferencia de temperatura

$L_C$  = longitud característica

$u$  = viscosidad cinemática

Con  $T_{aire} = 30^\circ C$  y  $T_w = 110^\circ C$  (asumida)

Para el aire<sup>10</sup> a  $T_{prom.} = 70^\circ C$

---

<sup>10</sup> ibid., 760p.

$$k = 0.03003 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$$

$$u = 20.76 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0.697$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$L_c = 2pr = 0.4 \text{ m}$$

$$b = \frac{1}{T}, \text{ pero } T = T_{\text{aire}} \text{ en escala absoluta}$$

$$\text{entonces, } b = \frac{1}{30 + 273} = 0.0033$$

reemplazando en la ecuación (29):

$$Gr = 0.38 * 10^9$$

Igualmente reemplazando en la ecuación (28):

$$Ra = 0.27 * 10^9$$

el valor de  $R_a$  se encuentra dentro el rango permitido.

Por lo tanto, reemplazamos en la ecuación (27):

$$Nu = 75.5$$

Finalmente, reemplazamos en la ecuación (26):

$$h = 5.67 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Llegando así a calcular:

$$R_{aire} = 0.386 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Para hallar el valor total de las resistencias, aplicamos la ecuación (20):

$$\sum R = 0.00082 + 0.054 + 0.386$$

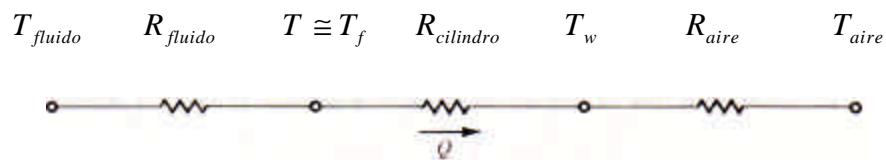
$$\sum R = 0.44 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

El calor disipado por el cilindro interno será:

$$Q = \frac{(120 - 30)}{0.44}$$

$$\mathbf{Q=204 \text{ W}}$$

Para verificar la temperatura  $T_w$  que asumimos, hacemos analogía al circuito eléctrico.



$$Q = \frac{T_f - T_a}{\sum R} = \frac{T_w - T_a}{R_{aire}}$$

$$204 = \frac{T_w - 30}{0.386}$$



Despejando:

$$T_w = 108.74^\circ C$$

La temperatura supuesta es aceptable, comparada con la calculada.

Para hallar el calor total que deberá disipar la resistencia, debemos sumar todos los calores calculados; por lo tanto:

$$\mathbf{Q=1120\ W}$$

Multiplicando este valor por un factor del 25% para tener en cuenta las pérdidas hacia el medio ambiente, tenemos:

$$\mathbf{Q=1400\ W}$$

## 6. COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO Y SU SELECCIÓN

### 6.1 MECÁNICOS

**6.1.1 Cilindro Interno.** Es uno de los componentes principales que constituyen el viscosímetro, por lo que para su fabricación, se tuvo en cuenta las condiciones de trabajo a la cual estará sometido, como lo son las altas temperaturas, la velocidad y el medio ambiente. Por lo tanto, uno de los materiales más apropiados es el aluminio, ya que posee una alta conductividad térmica, baja densidad y buena resistencia a la corrosión, además de ser un material económico ante otros, como el acero.

Este cilindro fue fabricado en un torno mediante maquinado. La superficie externa del cilindro presenta un acabado superficial tipo espejo para disminuir las irregularidades, las cuales, podrían producir turbulencia en el fluido.

En la parte interna de su base se encuentra un flanche roscado a un eje, que a su vez, estará sujeto a la estructura del equipo mediante rodamientos rígidos de bolas.

El dimensionamiento del cilindro es:

Diámetro externo: 128 mm

Diámetro interno: 106 mm

Altura : 149 mm

**6.1.2 Cilindro Externo.** Para el cilindro externo se tomó el mismo material que para el cilindro interno, teniendo en cuenta las condiciones antes mencionadas. Este cilindro posee un acabado tipo espejo en su parte interna, además tiene una pequeña inclinación que permite evacuar el fluido en prueba, a través de un orificio de drenaje que se encuentra en su parte central.

El dimensionamiento del cilindro es:

Diámetro externo: 152 mm

Diámetro interno: 132 mm

Altura: 169 mm

**6.1.3 Alambres de Torsión.** Los alambres de torsión tienen como objetivo fundamental la de oponer un torque al producido por la acción del fluido sobre el cilindro interno, de manera que las deformaciones angulares sufridas por el alambre sean leídas en una escala en grados como valor representativo al torque aplicado al detenerse el cilindro interno.

La mayor fuente de error, tanto en el viscosímetro de cilindros concéntricos como en los otros viscosímetros de torsión, es debida a la deformación semipermanente originada por la elasticidad imperfecta de los alambres.

Los alambres de torsión son pequeños y muy delicados y, si no se manejan cuidadosamente, pueden sufrir daños irreparables. Para lograr un correcto uso, éstos no deben ser deformados un ángulo mayor al admisible, el cual depende del material, la longitud, el diámetro y el torque aplicado, como lo expresa la ley de Hooke.

Para fluidos altamente viscosos se recomienda utilizar el alambre de mayor diámetro, el cual permite una mayor deformación; y para fluidos de baja viscosidad

el alambre de menor diámetro es el adecuado, ya que de no ser así podrían producirse deformaciones plásticas.

## 6.2 ELÉCTRICOS

**6.2.1 Motor Eléctrico.** La característica principal del motor es la de inducirle movimiento al cilindro externo.

El motor comercial que se ajustó a las condiciones de diseño, presenta las siguientes características:

- Potencia : ½ HP.
- Velocidad : 2560 r.p.m.
- Voltaje : 110 V. 60 Hz. 1.0 Amp.

**6.2.2 Resistencia Eléctrica.** Es la encargada de suministrar el calentamiento al líquido que se desee ensayar. La resistencia seleccionada presenta las siguientes características:

- Potencia: 1400 W
- Voltaje: 220 V
- Forma: Banda
- Diámetro interior: 155 mm
- Ancho: 155 mm

La resistencia eléctrica se encuentra montada concéntricamente al cilindro externo y soportada por su parte posterior en el perfil C del equipo.

Para evitar la disipación de calor hacia el medio ambiente, la resistencia se

encuentra cubierta en su exterior con una capa de asbesto.

**6.2.3 Regulador de Velocidad.** Para regular la velocidad del motor se utilizó un instrumento (reóstato) que se encuentra conectado en serie con el interruptor y el motor eléctrico, y tiene como objeto regular el paso de la corriente eléctrica hacia el motor, para así obtener las diferentes velocidades requeridas.

**6.2.4 Pirómetro.** El pirómetro es un instrumento utilizado para controlar la temperatura de un sistema con base en una acción de corte y suministro de corriente de la fuente de calentamiento (resistencia).

El pirómetro inicialmente suministra corriente hacia la fuente de calentamiento hasta alcanzarse la temperatura pre-ajustada. Una vez alcanzada la temperatura, automáticamente se interrumpe el flujo de corriente, pero por la inercia del calentamiento, la temperatura alcanza un valor un poco superior al pre-ajustado. A partir, de este valor máximo la temperatura empieza a descender, alcanzando un valor inferior al pre-ajustado, momento en el cual se inicia nuevamente el suministro de corriente. De esta manera, el valor de la temperatura estará oscilando alrededor del valor pre-ajustado.

De acuerdo a las condiciones de operación que trabajará el equipo, se seleccionó un pirómetro con las siguientes características:

- Rango de Temperatura: 0-400 °C
- Indicador de desvío:  $\pm 40^{\circ}\text{C}$
- Voltaje: 110-220V
- Tipo: Análogo

**6.2.5 Termocupla.** Son elementos utilizados como sensores dentro de un sistema de control.

Para la selección de una termocupla hay que tener en cuenta la temperatura máxima que se quiere sensar; una vez conocida tal temperatura, se analizan las condiciones de operación, como el ambiente donde se va a trabajar, si se quiere introducir en un fluido o un gas, si se debe aislar o no; y por último, tener en cuenta el dimensionamiento del recipiente donde se va a instalar.

El tipo de termocupla más sencilla que cumple con las condiciones de operación es el del tipo J.

La termocupla se encuentra instalada en el cilindro interno en un orificio que se practicó en la pared del mismo, siendo fijado con un recubrimiento de teflón para evitar alguna fuga de aceite.

**6.2.6 Contactor.** Son dispositivos utilizados para transferir o pasar una señal eléctrica de un circuito de baja capacidad a otro de menor, igual o mayor potencia. Dentro del equipo se utilizaron dos contactores, uno para el motor y otro para la resistencia. El Contactor para el motor se escogió teniendo en cuenta sus características, siendo el seleccionado de 15 Amperios. Asimismo, se tuvo en cuenta las características de la Resistencia Eléctrica, por lo que se seleccionó uno de 20 Amperios.

**6.2.7 Cables.** Para la selección de los cables que se utilizaron en las conexiones eléctricas del equipo fue necesario considerar la corriente que circulará a través de ellos, el voltaje con que se trabajará y la longitud. En el Anexo A, se puede observar la tabla que se utilizó para la selección de los cables.

## **7. MONTAJE, CALIBRACIÓN Y OPERACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA ENSAYOS DE VISCOSIDAD EN LÍQUIDOS**

### **7.1 MONTAJE DEL BANCO DE PRUEBAS**

Para el buen funcionamiento del banco de pruebas, fue necesario que el montaje de cada uno de los elementos que lo constituyen se realizara de forma cuidadosa, ya que de esta manera se podrán obtener los mejores resultados en la medición. Es por eso, que se siguieron de manera rigurosa los siguientes pasos:

- En primer lugar, acoplar rígidamente los cilindros a los ejes por medio de sus respectivos flanches, teniendo en cuenta que este acople asegure que no se originen vibraciones producidas por el desajuste. Además, colocar la polea conducida al eje del cilindro externo y asegurarlo por medio de una chaveta.
- Seguidamente, colocar los soportes guías al cilindro externo y atornillarlos al perfil en C que soportará los cilindros.
- Luego, se repite la operación anterior para el cilindro interno teniendo en cuenta apretar los tornillos alternamente en cruz para que evitar el desalineamiento de los cilindros y conservar la concetricidad entre estos; de no ser así, se deben aflojar los tornillos y repetir nuevamente el paso.
- Posteriormente, colocar la correa que transmitirá el movimiento al cilindro externo por medio del motor eléctrico, buscando la tensión adecuada con ayuda de la base corrediza del motor.

- Por último, en la preparación del equipo, se introduce el tornillo tensor superior a través del tubo guía, siendo ajustado por medio de contratuercas; para así, realizar el montaje del alambre de torsión a los tornillos tensores de la siguiente manera:
  - ◆ Se toma el alambre de torsión y se introduce en el tornillo tensor inferior taladrado, aplicándole un doblez que permitirá que no se salga. Luego, se procede a enroscar en la parte superior del eje que soporta el cilindro interno.
  - ◆ Realizado el paso anterior, se toma el otro extremo del alambre y se introduce en el orificio del tornillo tensor superior fijándolo por medio de un prisionero.
  - ◆ Finalmente para tensionar el alambre de torsión, se desenrosca un poco la contratuerca inferior, mientras se hala el tornillo y se procede a enroscar la contratuerca superior e inferior hasta llegar a la tensión deseada.

## 7.2 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

Para hallar el torque real que ejerce el fluido sobre la superficie externa del cilindro interno, es necesario tener en cuenta el torque ejercido sobre el alambre y el torque para vencer la fricción de los rodamientos que soportan los cilindros, por tanto:

$$T_C = T_A + T_f \quad (30)$$

donde,

$T_C$  = Torque ejercido por el fluido sobre el cilindro

$T_A$  = Torque ejercido por el alambre

$T_f$  = Torque para vencer la fricción de los rodamientos



- El torque ejercido sobre el alambre viene dado por<sup>11</sup>:

$$T_A = \frac{Gq}{L} J = \frac{Gqp d^4}{32L} \quad (31)$$

Donde,

$G$  = Módulo de rigidez del alambre, en kgf/mm<sup>2</sup>

$q$  = Angulo de deformación del alambre, en rad.

$J$  = Momento Polar de Inercia de la sección recta, en mm<sup>4</sup>

$L$  = Longitud del Alambre, en mm.

Asimismo vemos que el ángulo de deformación ( $q$ ) está relacionado en forma lineal con  $T_A$ .

Remplazando (31) en (30):

$$T_C = \frac{GJpd^4}{32L} + T_f \quad (32)$$

Despejando  $q$ , tenemos:

$$q = \frac{32L(T_C - T_f)}{pd^4G} \quad (33)$$

- El torque ejercido por el fluido sobre la superficie del cilindro interno, está dada por la ecuación (5):

$$T_C = \frac{\mu p^2 r_1^2 r_2 N h}{15b} \quad (34)$$

reemplazando (34) en (33):

---

<sup>11</sup> SINGER, Op.cit.63p.

$$q = \frac{32L}{pd^4G} \left[ \frac{np^2 r_1^2 r_2 Nh}{15b} - T_f \right]$$

resolviendo:

$$q = \frac{32Lnp r_1^2 r_2 Nh}{15bd^4G} - \frac{32LT_f}{pd^4G} \quad (35)$$

Haciendo,

$$C_1 = \frac{32Lnp r_1^2 r_2 H}{15bd^4G} \quad \text{y} \quad C_2 = \frac{32LT_f}{pd^4G}$$

Obtenemos:

$$q = C_1 mN - C_2 \quad (36)$$

Donde  $C_1$  es una constante que depende de las características del viscosímetro, y  $C_2$  depende de las propiedades del alambre, como del torque para vencer la fricción de los rodamientos.

Además, observamos de la ecuación (36) que el ángulo de deformación varia linealmente con la viscosidad y la velocidad.

Al tener tabulados los valores experimentales de  $q$  y  $N$  de un fluido a prueba y para relacionarlos, el primer paso consiste en graficarlos en un sistema de coordenadas rectangulares, hallándose lo que se denomina diagrama de dispersión, para luego determinar una curva que mejor se ajuste,

$$q = bN + C_2 \quad (37)$$

y para esto debemos recurrir a un método de aproximación, y el más indicado es el “Método de los Cuadrados Mínimos”.

Donde  $C_2$  es negativa por las irreversibilidades del equipo.

Igualando (36) y (37), obtenemos:

$$C_1 = \frac{b}{m} \quad \text{ó} \quad C_1 = \frac{b}{u}$$

Donde  $b$  puede ser obtenida experimentalmente y  $m$  ó  $u$  son conocidas del fluido de calibración.

Para un fluido cualquiera que se le vaya a determinar la viscosidad, se le halla experimentalmente en el equipo la ecuación (37) y se toma el valor de  $b$  y se divide por la constante de calibración  $C_1$ .

$$m = \frac{b}{C_1} \quad \text{ó} \quad u = \frac{b}{C_1}$$

De manera que se halla la viscosidad cinemática  $u$  si se toma dicha viscosidad para la calibración, e igualmente ocurre con la viscosidad dinámica  $m$ .

**7.2.1 Método de los Cuadrados Mínimos.** El método estadístico comúnmente empleado para estimar las curvas de regresión es el de los cuadrados mínimos. Este método puede ser usado para estimar tanto ecuaciones de regresión lineales como curvilíneas (no lineales).

No discutiremos el método de los cuadrados mínimos con mucho detalle. Sin embargo, haremos directamente una analogía con nuestro caso.

La ecuación de la recta estimada está dada por:

$$\mathbf{q} = \mathbf{a}_1 N + \mathbf{a}_0 \quad (38)$$

donde:

$$\mathbf{a}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{q} - \mathbf{a}_1 \sum_{i=1}^n N}{n} \quad \text{y} \quad \mathbf{a}_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n N \mathbf{q} - \left( \sum_{i=1}^n \mathbf{q} \right) \left( \sum_{i=1}^n N \right)}{n \sum_{i=1}^n N^2 - \left( \sum_{i=1}^n N \right)^2} \quad (39)$$

comparando las ecuaciones (37) y (38):

$$\mathbf{a}_0 = C_2$$

$$\mathbf{a}_1 = \mathbf{b}$$

Al recolectar los valores experimentales de  $\mathbf{q}$  y  $N$ , hay que tener en cuenta que debe existir entre ellos una buena relación lineal, de no ser así, estos valores deben descartarse, ya que pueden ser productos de una mala medición, de errores debidos a la alta sensibilidad del equipo, o por variaciones de voltaje.

### 7.3 OPERACIÓN DEL EQUIPO

Para el buen funcionamiento y operación de una máquina, se deben seguir una serie de pasos, que en el caso del viscosímetro se enuncian a continuación:

- Antes de efectuar cualquier tipo de prueba, se recomienda que los cilindros estén limpios de sustancias diferentes a las que se piensan utilizar, para lo cual se sugiere una limpieza previa con un disolvente; ya que de no ser así, podrían presentarse mediciones erróneas. Asimismo, se debe verificar que las conexiones eléctricas y la energización sean las mostradas en el plano.

- Verificar que la Escala MacMichael se encuentre en cero y que el alambre esté tensionado hasta una longitud de 350 mm, de no ser así esto último, se realizará el procedimiento indicado en el ítem 7.1.
- Aplicar por medio de una jeringa la cantidad de fluido a utilizar (142 cm<sup>3</sup>) y verificar que el tornillo tapón esté bien ajustado.
- Seleccionar la temperatura de prueba (40 ó 100 °C) del fluido, de acuerdo con la norma ASTM D88 y D445 en la escala del pirómetro, para esto se recomienda llevar en forma gradual la temperatura seleccionada disminuyendo así la inercia del calentamiento. Por ejemplo, para la temperatura de 40 °C se lleva la aguja del pirómetro hasta 20 °C, alcanzada ésta, nuevamente se repite el procedimiento anterior hasta una temperatura inferior a los 40 °C y por último se ubica en los 40 °C deseados. Para alcanzar un calentamiento más uniforme se recomienda encender el motor unos minutos antes.
- Realizado el paso anterior, se procede a buscar una velocidad que de inicio a la deformación angular del alambre, que pueda ser leída en la Escala MacMichael. Esta velocidad puede ser determinada en el eje del cilindro externo por medio de un tacómetro digital, para mayor precisión. Este procedimiento se repite un número considerable de veces, para alcanzar así un menor margen de error en el cálculo de la viscosidad.
- Recopilar y tabular los datos hallados en el paso anterior, para luego proceder al cálculo de la viscosidad. Por último, se realiza el apagado del equipo de manera inversa al encendido del mismo.
- Para el drenaje del fluido, se coloca un recipiente debajo del tornillo tapón y se procede a desenroscarlo con precaución para evitar posibles quemaduras en caso de encontrar el fluido caliente.

- Asegurándose que todo el fluido en prueba haya descendido completamente y los cilindros se encuentren enfriados, se coloca nuevamente el tornillo tapón, para luego verter una cantidad de disolvente igual al volumen de líquido ensayado y poner en marcha el motor para una mejor limpieza. Seguidamente, se desenrosca el tornillo tapón para drenar el disolvente.
- Después de enroscar el tornillo tapón, se desenergiza completamente el equipo y se coloca la tapa de los cilindros para evitar filtraciones de partículas extrañas.

## 8. CALCULOS PARA HALLAR LA VISCOSIDAD

En primer lugar, para poder hallar la viscosidad de un fluido hay que calcular las constantes de calibración a 40°C y 100°C del equipo. Para esto fue necesario emplear un aceite calibrado de una Empresa especializada en Lubricantes, como lo es TERPEL.

En el anexo B. se presenta una tabla con las viscosidades a 40°C y 100°C de diferentes lubricantes que servirán de parámetro para determinar la exactitud del equipo.

Para calcular las constantes de calibración a 40°C y 100°C se tomó el lubricante industrial muestra N° 2 (A.T.F. HAMBLEND), con las siguientes viscosidades:

**Viscosidad cinemática a 40°C: 36.78 cSt**

Viscosidad cinemática a 100°C: 6.79 cSt

### ➤ CALIBRACIÓN A 40°C

Las pruebas realizadas con nuestro equipo, arrojaron los siguientes resultados, empleando el alambre de torsión de  $d = 2.41$  mm.

**Cuadro 15. Valores experimentales para prueba en Aceite Industrial (A.T.F. HAMBLEND) a 40°C**

PRUEBA#(n)	N(r.p.m)	q (°McMichael)
1	363	2.5
2	504	3.5
3	556	4.5
4	636	5.0
5	717	6.0
6	844	7.0
7	982	8.0
8	1125	9.0
9	1271	10.5
10	1421	11.0

Con los resultados de la tabla obtenidos experimentalmente, hallamos cada uno de los términos de las ecuaciones (39).

$$C_2 = a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n q - a_1 \sum_{i=1}^n N}{n} \quad \text{y} \quad b = a_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n Nq - \left( \sum_{i=1}^n q \right) \left( \sum_{i=1}^n N \right)}{n \sum_{i=1}^n N^2 - \left( \sum_{i=1}^n N \right)^2} \quad (39)$$

donde,

$$\sum_{i=1}^n q = 2.5 + 3.5 + 4.5 + 5.0 + 6.0 + 7.0 + 8.0 + 9.0 + 10.5 + 11 = 67$$

$$\sum_{i=1}^n N = 363 + 504 + 556 + 636 + 717 + 844 + 982 + 1125 + 1271 + 1421 = 8419$$

$$\sum_{i=1}^n Nq = (363 \cdot 2.5) + (504 \cdot 3.5) + (556 \cdot 4.5) + (636 \cdot 5.0) + (717 \cdot 6.0) + (844 \cdot 7.0) + (982 \cdot 8.0) +$$



$$(1125*9.0)+(1271*10.5)+(1421*11)=65521$$

$$\sum_{i=1}^n N^2 = (363^2) + (504^2) + (556^2) + (636^2) + (717^2) + (844^2) + (982^2) + (1125^2) + (1271^2) + (1421^2) = 8190473$$

$$\left( \sum_{i=1}^n N \right)^2 = (8419^2) = 70879561$$

reemplazando los valores en la ecuación (39), tenemos:

$$b = 0.0083 \quad \text{y} \quad C_2 = -0.2593$$

luego, con los valores de  $b$  y  $C_2$  hallamos la ecuación (37):

$$q = bN + C_2 = 0.0083 * N - 0.2593$$

Para hallar la constante de calibración del equipo a 40°C, utilizamos la ecuación:

$$C_1 = \frac{b}{m} \quad \text{ó} \quad C_1 = \frac{b}{u}$$

de acuerdo al tipo de viscosidad que se este utilizando para la calibración del equipo (viscosidad cinemática o dinámica). Por lo tanto:

$$C_1 = \frac{b}{u} = \frac{0.0083}{36.78}$$

$$C_1 = 0.0002247$$

➤ **CALIBRACIÓN A 100°C**

Por razones expuestas en el capítulo anterior, para la calibración del equipo a 100°C, se utilizó un alambre de torsión de  $d = 1.6$  mm

Con los datos obtenidos experimentalmente del cuadro 16 damos inicio a calcular la constante de calibración.

**Cuadro 16. Valores experimentales para prueba en Aceite Industrial (A.T.F. HAMBLEND) a 100°C**

PRUEBA#( $n$ )	N(r.p.m)	$q$ (°McMichael)
1	651	3.0
2	704	5.0
3	757	6.0
4	824	8.0
5	912	10
6	982	11
7	1118	13
8	1258	15
9	1399	16.5
10	1549	18

De igual modo como se hizo anteriormente, se hallan los valores de  $b$  y  $C_2$  con la ecuación (39):

$$b = 0.0163$$

$$C_2 = -5.977$$

quedando así relacionado  $q$  y  $N$  :

$$q = 0.0163N - 5.977$$

con  $b$  y la viscosidad cinemática  $u$  del lubricante utilizado para la calibración se halla la constante de calibración a 100°C.

Entonces:

$$C_1 = \frac{b}{u} = \frac{0.0163}{6.79}$$

$$C_1 = 0.0024$$

Para calcular la viscosidad de cualquier líquido, se realiza el procedimiento anterior, se halla la constante  $b$  experimentalmente y se divide por la constante de calibración:

$$m = \frac{b}{C_1} \quad \text{ó} \quad u = \frac{b}{C_1}$$

Como manera de comprobación de las constantes de calibración realizaremos el siguiente ejemplo:

**LUBRICANTE:** TROJAN SAE 50 API SE

Viscosidad cinemática a 40 °C: 244.94 cSt

Viscosidad cinemática a 100°C: 18.86 cSt

**Cálculo a 40°C:**

Los valores obtenidos experimentalmente se encuentran en el cuadro 17

**Cuadro 17. Valores experimentales para prueba en Aceite Automotor  
(TROJAN SAE 50 API SE) a 40°C**

PRUEBA#( <i>n</i> )	N(r.p.m)	<i>q</i> (°McMichael)
1	155	8.0
2	220	12
3	346	16
4	420	20
5	473	25
6	560	28
7	650	34
8	742	40
9	837	44
10	936	49

Con estos valores se hallan cada uno de los términos de la ecuación (39), lográndose calcular las constantes ***b*** y  $C_2$ .

$$b = 0.0536$$

$$C_2 = -1.017$$

Con el valor de ***b*** y la constante de calibración  $C_1$  a 40°C se procede a calcular la viscosidad cinemática del lubricante, para luego ser comparada con la suministrada por la Empresa Terpel.

$$u = \frac{b}{C_1} = \frac{0.0536}{0.0002247}$$

$$u = 238.54 \text{ cSt}$$

**Cálculo a 100°C:**

Igualmente se procede a tabular los valores obtenidos experimentalmente.

**Cuadro 18. Valores experimentales para prueba en Aceite Automotor  
(TROJAN SAE 50 API SE) a 100°C**

<b>PRUEBA#(n)</b>	<b>N(r.p.m)</b>	<b>q (°McMichael)</b>
<b>1</b>	250	5.0
<b>2</b>	290	8.5
<b>3</b>	310	15
<b>4</b>	430	20
<b>5</b>	610	26
<b>6</b>	703	30
<b>7</b>	845	36
<b>8</b>	1010	43
<b>9</b>	1120	47
<b>10</b>	1230	51

Realizando el mismo procedimiento, se calcularon las constantes:

$$b = 0.0441$$

$$C_2 = -1.8292$$

Para luego, hallar el valor de la viscosidad, utilizando la constante de calibración a 100°C:

$$u = \frac{b}{C_1} = \frac{0.0441}{0.0024}$$

$$u = 18.375 \text{ cSt}$$

## 8.1 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Después de haber hecho las anteriores pruebas solo resta hacer el respectivo análisis. Con los resultados obtenidos experimentalmente de la viscosidad y los resultados entregados por la Empresa Terpel procedemos a compararlos.

<b>Tipo de lubricante</b>	<b>Resultados de Terpel</b>	<b>Resultados del Equipo</b>	<b>% Error de la medición</b>
TROJAN SAE 50 API SE a 40 °C	244.94 cSt	238.54 cSt	2.61
TROJAN SAE 50 API SE a 100 °C	18.86 cSt	18.375 cSt	2.57

Después de realizar pruebas con las muestras industrial y automotor, suministradas por TERPEL, se dejan dos muestras más (Ver Anexo B) para que los estudiantes del Laboratorio de Máquinas Hidráulicas realicen los ensayos, tomando como base las experiencias hechas por los autores del proyecto, y así puedan sacar sus propias conclusiones.

## 9. CONCLUSIONES

Después de realizar el Diseño, Construcción y Montaje del Banco de Pruebas para Ensayos de Viscosidad en Líquidos, se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- En cuanto al diseño del equipo, se tuvo que asumir varios aspectos; ya que comercialmente éste no se encuentra en el mercado, y al información hallada fue tomada de textos relacionados al área de fluidos y de lubricación.
- Para la obtención de unos resultados óptimos, fue necesaria la calibración del equipo con ayuda de una empresa especializada y reconocida nacional e internacionalmente en la producción de lubricantes, como es **TERPEL S.A.**, garantizando así la confiabilidad del Banco de Pruebas.
- En el cálculo de la viscosidad de los fluidos, se tomaron como referencia las normas **ASTM** (American Standard for Testing Material) **D88** y **D445**.
- Un aspecto importante dentro del diseño, fue la selección del material de los cilindros, ya que éste, debería cumplir una serie de condiciones tales como: baja densidad, alta conductividad térmica, y facilidad para el maquinado.
- En cuanto a la construcción y el montaje del equipo, se necesitó de mucho cuidado, ya que la medición depende en gran parte de la concentricidad de los cilindros.

- De otro lado, se presentaron problemas en la consecución de un motor eléctrico que cumpliera con las condiciones de diseño, como fue la baja potencia y que sirviera para la regulación de la velocidad de manera fácil.
- Se recopiló buena información sobre la aplicación de lubricantes y automotores, realizando y anexando pruebas a 40 y 100°C, dando como resultados márgenes de error dentro lo permitido.
- Comparados los resultados arrojados por el equipo con los de otros viscosímetros, se pudo apreciar la obtención de buenos resultados en la medición de la viscosidad, comprobando así la Ley con que fue diseñado el Banco de Pruebas (Ley de Viscosidad de Newton).
- Con base en el capítulo de operaciones del equipo y el cálculo de la viscosidad, se puede elaborar una guía de laboratorio de acuerdo a las consideraciones del docente que desee realizar los ensayos de viscosidad en líquidos, o sino tomar la guía entregada al encargado del laboratorio.



## BIBLIOGRAFIA

ALBARRACIN, Pedro. Lubricación Industrial y Automotriz. Medellín: Copiservicio, 1985.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Anual Book of ASTM Standard. USA, 1980.

AVNER, Sidney. Introducción a la Metalurgia Física. 2ed. México: Mc Graw-Hill, 1983. 317p.

BENLLOCH, José. Lubricantes y Lubricación Aplicada. 2ed. Barcelona: Ediciones CEAC, S.A., 1985

FULLER, Dudley. Teoría y Práctica de la Lubricación. Madrid: Taller Gráfico CIES, 1961. 11p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Tesis y otros trabajos de grado. Bogotá: ICONTEC., 1998. NTC. 1486.

KARLEKAR, B. Transferencia de Calor, 2ed. México: Mc Graw-Hill, 1994. 770p.

KERN, Donald. Procesos de Transferencia de Calor. México: CECSA, 1995.

SHIGLEY, Joseph. Diseño en Ingeniería Mecánica, 5ed. México: Mc Graw-Hill, 1980. 282p.

SINGER, Ferdinand. Resistencia de Materiales, 4ed. México: Mc Graw-Hill, 1980. 282p.

STREETER, Víctor. Mecánica de los Fluidos, 8ed. México: Mc Graw-Hill, 1994.

