

INDICE GENERAL

TOMO III

	Indice	
	Prefacio	
1.	Teoría de la Lubricación	5
1.1.	Introducción	5
1.2.	Fricción seca	6
1.3.	Fricción fluida	8
1.3.1.	Modulo de elasticidad de sólidos	9
1.3.2.	Definición de fluido, viscosidad cinemática	11
1.4.	Teoría hidrodinámica de la lubricación	14
1.4.1.	Cojinete cilíndrico concéntrico	14
1.4.2.	Mecánica de los fluidos	18
1.4.3.	Fluidos reales número de Reynolds	22
1.4.4.	Las superficies	26
1.4.5.	Ley de Poiseuille	27
1.4.6.	Película de espesor no uniforme	28
1.4.7.	Ecuación de Reynolds – distribución de presión	29
1.4.8.	Teoría de Sommerfeld	33
1.5.	Lubricación Elastohidrodinámica, rodamientos	37
2.	Tipos y selección de lubricantes	41
2.1.	Selección de lubricantes	41
2.2.	Lubricantes líquidos	44
2.3.	Lubricación en capa limite	46
2.4.	Lubricación en película delgada o mixta	50
2.5.	Características físico químicas de los lubricantes	51
2.5.1.	Emulsión	51
2.5.2.	Formación de espuma	51
2.5.3.	Punto de inflamación	52
2.5.4.	Numero de neutralización	55
2.5.5.	Numero de precipitación	55
2.5.6.	Cenizas	55
2.5.7.	Indice de viscosidad	55
2.5.8.	Color	59
2.5.9.	Antiherrumbre	60
2.5.10.	Viscosidad "C.C.S"	60
2.5.11.	Viscosidad Brookfield	61
2.6.	Lubricantes para cárter	61
2.6.1.	Clasificación de los aceites para cárter	62
2.6.1.1.	S.A.E., clasificación por viscosidad	62
2.6.2.	Clasificación por tipo de servicio	63
2.6.3.	Los aceites multigrado	69
2.7.	Lubricantes para engranajes	71
2.7.1.	Propiedades Extrema Presión	72
2.7.2.	Ensayos para aceites E.P.	74
2.7.3.	Transmisiones automáticas	75
2.8.	Lubricantes no minerales	78
2.9.	Aditivos mejoradores	80
2.9.1.	Inhibidores de oxidación, corrosión y desgaste	81
2.9.2.	Aditivos disperantes	82
2.9.3.	Aditivos detergentes	83
2.9.4.	Mejoradores de índice de viscosidad	84
2.9.5.	Depresores del punto de escurrimiento y atiespumas	84

3.	Lubricantes Industriales	85
3.1.	Lubricantes para turbinas a vapor	85
3.2.	Aceites para mecanismos hidráulicos	87
3.3.	Aceites para compresores	87
3.4.	Aceites para transformadores	89
4.	Obtención de lubricantes	90
4.1.	Plantas de refinación de cortes bases	92
4.1.1.	Furfural	92
4.1.2.	Desparafinado, planta MEK	93
4.1.3.	Hidroterminado	94
4.1.4.	Casa de mezclas y envasado	95
4.1.5.	Cortes bases y aceites terminados	95
5.	Las grasas lubricantes	97
5.1.	Estructuras de las grasas	98
5.2.	Clasificación, propiedades y ensayos de las grasas	100
5.2.1.	Calificación NLGI	100
5.2.2.	Penetración	103
5.2.3.	Punto de goteo	103
5.2.4.	Estabilidad a la oxidación	106
5.2.5.	Propiedades anticorrosivas	106
5.2.6.	Protección contra desgaste	106
5.3.	Tipos de grasas	107
5.3.1.	Grasas cálcicas	107
5.3.2.	Grasas sódicas	107
5.3.3.	Grasas de litio	108
5.3.4.	Grasas de aluminio	108
5.3.5.	Grasas complejas	108
5.3.6.	Fabricación de grasas	110
5.3.7.	Aditivos para grasas lubricantes	111
6.	Lubricación aplicada	114
6.1.	Lubricación de rodamientos	114
6.2.	La lubricación del automotor	116
6.2.1.	El cambio de aceite	118
6.3.	Recuperación de aceite usado	120
6.4.	Lubricación por gas	121
6.5.	Estadísticas	121
7.	Asfaltos	122
7.1.	Composición química, maltenos y asfaltenos	123
7.2.	Propiedades reológicas	127
7.3.	Introducción a la pavimentación con asfaltos	130
7.4.	Metodos de análisis	131
7.4.1.	Ensayo de penetración	132
7.4.2.	Ensayo de ductilidad	134
7.4.3.	Otros ensayos de uso común	134
7.5.	Los Asfaltos en la técnica vial	137
8.	Bibliografía	141

PREFACIO

En el Tomo I se han presentado las más modernas operaciones y procesos que hacen a la industrialización del petróleo, el Tomo II habló de los combustibles, siendo el objetivo de este Tomo III los *lubricantes, las grasas y los asfaltos*, que constituyen un capítulo teórico – práctico de singular importancia dentro de la tecnología de la *Refinación del Petróleo*.

Resultan válidos los conceptos del *Prefacio* del Tomo I, reiterando los dos últimos párrafos que hablan de por que y para que se escribiera, como lo que se aguarda de la paciencia de los Señores lectores.

"La experiencia que el autor ha hecho en YACIMIENTOS PETROLIFEROS FISCALES, la SECRETARIA DE ENERGIA DE LA NACION. Los cursos dictados en la Cátedra de Combustibles y Lubricantes de la ESCUELA SUPERIOR TECNICA DEL EJERCITO Gral. MANUEL M SABIO Y Combustibles II en la UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA(UADE), juntamente con los cursos preparados para el INSTITUTO ARGENTINO DEL PETROLEO, se ha intentado volcar como colaboración al conocimiento y mejor aplicación de los combustibles y lubricantes del petróleo."

"De los defectos, errores y omisiones que se han cometido se espera recibir de los amables lectores las sugerencias y proposiciones que crean convenientes, tanto en el IAPG como en la EST, en la seguridad que se tomarán en cuenta para realizar las necesarias revisiones."

El Autor

1.- TEORIA DE LA LUBRICACION

El estudio de la lubricación tiene un interés preponderante, ya sea para las personas en particular o para la industria y los servicios que conforman la sociedad. Por su relación directa con los programas de obras públicas, o las políticas energéticas, los gobiernos deberían dar al tema la importancia que realmente tiene en cuanto a ahorro de recursos. Así mismo las fuerzas armadas, con problemas tan simples como un cerrojo y tan complicados como los aviones supersónicos, requieren un conocimiento acabado de la lubricación. Los transportes, el trabajo de campo con su maquinaria tan específica, todo aquello relacionado con la transformación de energía en trabajo, pueden lograr mejoras de rendimientos y duración de los mecanismos de significación mediante adecuados planes de lubricación. En el caso de los particulares, la mayor duración de los bienes de uso diario que provoca colabora a una mejor calidad de vida.

1.1. INTRODUCCION

La lubricación forma parte de una ciencia más amplia, denominada TRIBOLOGIA (del Griego "tribos"; *fricción*, "logos"; *estudio*). Todo lo que se mueve forma parte de un sistema tribológico; los sistemas mecánicos, las articulaciones de los animales o los estudios aerodinámicos sobre los distintos vehículos utilizados por el hombre para transportarse. Por lo tanto podemos decir que es la ciencia de los sistemas en movimiento.

Todo movimiento relativo entre dos superficies en contacto genera una resistencia a ese movimiento, denominada *fuera de fricción*, causante de pérdidas de energía, como del desgaste de las mencionadas superficies entre otros efectos. El contacto puede darse entre sólidos o entre un sólido y un líquido, como entre sólidos y gases. La tribología incluye el estudio de esta fricción y desgaste, además de la lubricación o el diseño de sistemas mecánicos en movimiento, haciendo uso de la Química, la Física, las Ingenierías y la Fisiología entre otras disciplinas científicas.

Distintos estudios han determinado que la aplicación de la tribología, en sus aspectos vinculados a la lubricación, puede tener una incidencia sumamente importante en el ahorro de energía. Se ha informado que en USA pueden obtenerse ahorros del orden de los 2000 millones de dólares al año y en UK de unos 1000 millones. Estos números incluyen, con la participación aproximada que se acompaña, los siguientes conceptos:

DISMINUCION DEL DESGASTE.....	5 %
DE MANO DE OBRA.....	2 "
DE CONSUMO LUBRICANTES.....	2 "
DE MANTENIMIENTO Y REPUESTOS..	45 "
DE ROTURAS.....	22 "
DE INVERSIONES.....	4 "
DE CONSUMO COMBUSTIBLES.....	20 "

En la última década en países como los mencionados, tanto como en Alemania, Francia o Rusia, se han creado importantes centros de estudios de la Tribología, habiendo sido introducida como asignatura de las carreras ingenieriles o químicas. En España en el año 1975 se formó un Grupo Especializado en Tribología en la Sociedad Española de Física y Química, dedicado a la investigación, desarrollo y enseñanza de la misma.

Actualmente el campo de la investigación y desarrollo en Tribología es uno de los más prometedores para los profesionales inquietos. Encontrar mejores lubricantes, innovar en el diseño de los mecanismos, lograr aumentar las temperaturas de los cojinetes para aumentar la eficiencia del ciclo de Carnot, diseñar máquinas más pequeñas y livianas, generalizar el uso

del gas como lubricante de cojinetes, incorporar la ecología a los programas de trabajo, son algunos de los desafíos que esperan a los estudiosos.

Como ejemplo podemos decir que en un automóvil, del total de la energía aportada por el combustible, solo llega a las ruedas un doce por ciento, perdiéndose en procesos intermedios el resto. Esta pérdida puede ser mejorada y la herramienta para ello es la Tribología. La distribución del cien por cien de la energía aportada en un vehículo de paseo se puede considerar de la siguiente forma:

ENERGIA APORTADA		100 %
HP INDICADO.....	38 %	
REFRIGERACION.....	29 "	
ESCAPE.....	33 "	
HP INDICADO.....		38 %
BOMBEO DE AIRE.....	6 %	
FRICCIONES DEL MOTOR	7 "	
HP AL FRENO.....	25 "	
HP AL FRENO.....		25 %
ACCESORIOS		
(ALTERNADOR., BOMBAS, VENTILADOR)...	2.5 %	
TRANSMISION, DIFERENCIAL.....	3 "	
FRENADOS, CAMBIOS DE MARCHA.....	7.5 "	
A LAS RUEDAS		12 %

Se estima que del total de energía que llega a las ruedas la mitad se utiliza en vencer la resistencia aerodinámica del aire y la otra mitad en el rozamiento de los neumáticos.

Se pueden mencionar áreas de investigación y desarrollo que en la actualidad están siendo motivo de creciente interés, tales como:

TRANSMISION VARIABLE CONTINUA: permite que el motor gire siempre en su régimen más económico, utilizando un volante de almacenamiento de energía y una película de lubricante de tracción.

MOTOR DIESEL ADIABATICO: las temperaturas que alcanzarían dichos motores serían del orden de los 800 °C o más, serían necesarios nuevos materiales y lubricantes. Se están estudiando pistones flotantes en películas de gas, con cero fricción.

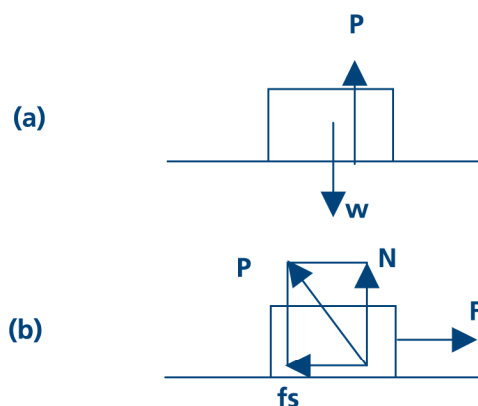
1.2. FRICCION SECA

Se estudia en la física clásica que cuando la superficie de un cuerpo desliza sobre la de otro, cada uno ejerce sobre el otro una fuerza de rozamiento paralela a las superficies y opuesta al movimiento. Las causas de estas fuerzas no están totalmente esclarecidas y su estudio esta dentro del campo de los fenómenos de superficie. Las superficies representan límites o fronteras entre las fases de los sistemas multicomponentes, ya sean sólidos, líquidos, gaseosos o combinados. Generalmente las superficies se encuentran en un estado energético perturbado, correspondientes a desequilibrios físico - químicos, que les dan propiedades especiales.

Los probables mecanismos de rozamiento entre superficies metálicas o maderas o cerámicas, deben ser de naturaleza totalmente distinta y su estudio otro reto a la ciencia.

Cuando el rozamiento se produce entre superficies metálicas, la hipótesis mas aceptada para explicar las fuerzas que se oponen al movimiento, es la aparición de *soldaduras momentáneas* entre las salientes propias de las irregularidades superficiales.

Fig. 1- Fuerza de fricción estática



Supongamos un bloque sólido descansando sobre una superficie horizontal tal como la Fig.1(a). Sobre el bloque actúan las fuerzas w , su propio peso y P , igual y contraria ejercida sobre él por la superficie, que se encuentran en equilibrio. Si comenzamos a aplicar otra fuerza F intentando mover el bloque, aparecerá una fuerza igual y contraria, f_s , denominada fuerza de fricción estática que se opondrá al movimiento. La componente normal N de P que por la aparición de f_s se inclina hacia la izquierda, permanecerá igual a w para mantener el equilibrio, Fig.1(b). Aumentando F llegará un momento de inminente movimiento, pasado el cual el bloque se despegará de la superficie, en ese momento F será mayor que f_s y se romperá el equilibrio, comenzando el movimiento.

La *fuerza de fricción estática* será proporcional a la componente normal de la fuerza aplicada sobre el bloque por la superficie. Durante el equilibrio, sin movimiento relativo, podemos escribir:

$$f_s = n_s N. \quad (1-1)$$

Donde :

n_s = coeficiente estático de rozamiento

En el momento de inminente movimiento será:

$$f_s = n_s N. \quad (1-2)$$

Cuando el movimiento comienza, el valor de la fuerza de rozamiento disminuye, denominándose fuerza de fricción cinética, f_k , con una constante de proporcionalidad para una superficie dada, denominado coeficiente de fricción cinético, n_k , según:

$$f_k = n_k N. \quad (1-3)$$

Los coeficientes estáticos y cinéticos de fricción dependen de las superficies en contacto y de su estado de pulido. El cinético varía con la velocidad relativa de las superficies, si bien se lo toma como independiente en las aplicaciones técnicas. Como puede observarse se ha considerado a los coeficientes independientes del área de las superficies en contacto, cosa aproximada, pero que se justifica en el hecho que el contacto entre sólidos se produce entre las salientes, luego, la verdadera superficie en contacto, difiere mucho del área total.

Las ecuaciones vistas en este apartado deben ser consideradas como relaciones de tipo empírico, no debiendo confundirse con leyes físicas fundamentales como las de Newton.

EJEMPLO 1.- Un bloque de 12 Kg de peso, apoyado sobre una superficie horizontal, necesita que se le aplique una fuerza de 5 Kg para lograr que comience el movimiento. Una vez que ha comenzado a deslizarse hacen falta 2,6 Kg, para mantenerlo en movimiento uniforme.

Calcular los coeficientes estático y dinámico de rozamiento.

Supongamos que el bloque es el de la Fig. 1, para el cual se cumple en el estado de movimiento inminente la ley del equilibrio de Newton:

$$\left. \begin{aligned} \text{SUMA } F_y = 0 &= N - 12 \text{ Kg} \\ \text{SUMA } F_x = 0 &= 5 \text{ Kg} - f_s \end{aligned} \right\} \text{1ª ley de Newton}$$

$$\text{De (1-2)} \quad n_s = \frac{f_s}{N} = \frac{5 \text{ Kg}}{12 \text{ Kg}} = 0,42 \text{ (coeficiente de fricción estático)}$$

Para el caso del movimiento a velocidad constante, las ecuaciones del equilibrio serán:

$$\begin{aligned} \text{SUMA } F_y = 0 &= N - 12 \text{ Kg} \\ \text{SUMA } F_x = 0 &= 2,6 \text{ Kg} - f_k \end{aligned}$$

$$\text{De (1-3)} \quad n_k = \frac{f_k}{N} = \frac{2,6 \text{ Kg}}{12 \text{ Kg}} = 0,22 \text{ (coeficiente de fricción cinético.)}$$

Esta claro que no siempre la fricción es indeseable, el ajuste de una tuerca en su espárrago o de un elemento en un eje con el que debe girar solidario, un embrague, un freno cualquiera sea su diseño, una transmisión hidráulica, presentan distintas necesidades de fricción, en algunos casos maximizada y en otros controlada no precisamente en su mínima expresión.

Cuando se trata de disminuir la fricción entre dos superficies en movimiento relativo, se dice que sobre las mismas se aplican técnicas de *lubricación*. La reducción de fricción generalmente se obtiene interponiendo entre las superficies en contacto directo otra sustancia, sólida, líquida, o gaseosa, que anule aquel coeficiente de fricción seca del que ya hablamos.

El material introducido entre las superficies recibe el nombre de *lubricante*, el cual forma una película que separa dichas superficies. Como lubricantes pueden usarse una serie de productos de distintas procedencias, naturales o sintéticos, cuyas propiedades para el fin propuesto deben ser cuidadosamente evaluadas. De la habilidad de un lubricante no solo depende algún ahorro de energía, sino la posibilidad real de un diseño o la vida misma de un mecanismo.

En el estado actual de la tecnología de la lubricación debemos ampliar los conceptos anteriores, dado que no siempre es necesario intercalar un lubricante entre dos superficies para reducir la fricción, modernas técnicas físico - químicas producen modificaciones en las mismas superficies transformándolas en autolubricantes.

1.3. FRICCIÓN FLUIDA, VISCOSIDAD

Supongamos que entre las superficies en contacto de la Fig. 1 colocamos una capa líquida, de tal forma que las separe. Supongamos también que de esa capa líquida tomamos un elemento de volumen de un largo tal que no sea afectado por los extremos de las superficies en cuestión, de una altura h y de un área A en el sentido de las superficies. Si la superficie inferior se mantiene en reposo y la superior se desplaza a velocidad constante hacia la derecha, se transmitirá a nuestro elemento de volumen líquido una fuerza F que generará una tensión de corte T (o de cizalla), Fig. 2. El elemento de volumen se puede considerar

formado por varias capas de líquido que continuarán transmitiendo el efecto de la tensión de corte, tomando cada capa una velocidad Un , tal que en conjunto formarán el ángulo α con la perpendicular h .

La ley de Newton dice que la tensión de corte es proporcional al régimen de corte, siendo la primera la fuerza tangencial F por unidad de superficie y la segunda la velocidad U dividida h , luego podemos escribir:

$$S = \text{CONSTANTE} \times R,$$

donde :

$S = \text{TENSION DE CORTE}$

$R = \text{REGIMEN DE CORTE}$

O, reemplazando:

$$\frac{F}{A} = \frac{U}{h} \quad (1-4)$$

donde :

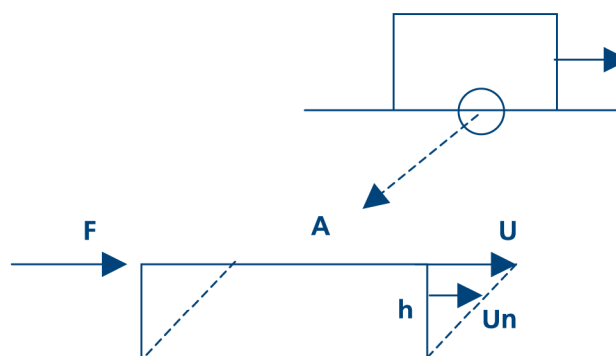
= COEFICIENTE DE VISCOSIDAD

La constante de proporcionalidad, que como se puede observar interviene en una ecuación de la forma de las (1-1) y (1-2) relativas a la fricción seca, recibe el nombre de COEFICIENTE DE VISCOSIDAD, o directamente VISCOSIDAD y está relacionada a la resistencia de cada capa a deslizarse sobre la contigua.

1.3.1. MODULO DE ELASTICIDAD DE SOLIDOS

Se puede establecer una analogía entre los argumentos que hemos utilizado para llegar al concepto de viscosidad y la elasticidad en los sólidos. Sabemos por la física que cuando sobre un cuerpo sólido actúa una fuerza, este se deforma, estando el cambio de volumen o de forma relacionado a las fuerzas intermoleculares. Si sobre una barra de sección transversal uniforme se aplican las fuerzas F , iguales y opuestas, en cada extremo, según la Fig. 3 (a), se dice que la barra se halla sometida a una TENSION. Si no hay movimiento el sistema se encontrara en equilibrio y se puede considerar que en la sección s de área A , la parte izquierda tirará de la derecha con una fuerza F y viceversa, generando una tracción uniformemente distribuida.

Fig. 2- Fricción hidrodinámica



La *tensión* no es una magnitud vectorial (tensores), ya que a diferencia de la fuerza no se le puede asignar dirección. En la parte (b) de la Fig. 3 se han representado las fuerzas tractoras F que actúan a ambos lados de la sección s , se define como tensión normal o más precisamente *fatiga tensora* o fatiga, a la relación:

$$S = \frac{F}{A}, \quad (1-5)$$

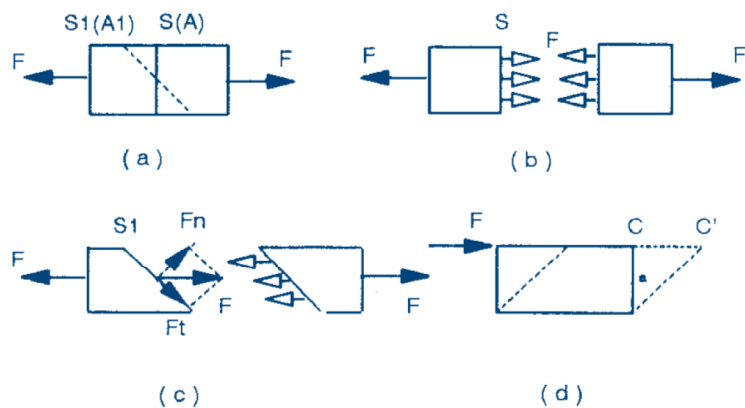
Si la sección tomada fuera la $s1$, de área $A1$ y descomponemos la fuerza F en sus componentes normal y tangencial a la superficie $A1$, Fig. 3(c), encontraríamos la fatiga tangencial o de corte St en la ecuación (1-6) y la fatiga normal Sn , según (1-7).

$$St = Ft / A1. \quad (1-6)$$

$$Sn = Fn / A1. \quad (1-7)$$

Si la barra se encontrara sometida a empuje en los extremos, se diría que está sometida a compresión y la fatiga sobre cualquier superficie interior sería *fatiga compresora*.

Fig. 3- Barra sometida a tensión



La deformación que sufre un cuerpo sometido a fatiga se expresa como deformación unitaria. Si la fatiga es cortante, debida a una fuerza F aplicada con relación a la superficie A , Fig. 3(d), siempre que no se pase el límite de elasticidad (Fig. 5), la ley de Hooke dice que la deformación unitaria es directamente proporcional a la fatiga. La deformación unitaria será la tangente del ángulo a , cc'/h , aunque en la práctica se utiliza directamente el ángulo. Luego será:

FATIGA CORTANTE = M x. DEFORMACION UNITARIA POR CORTE

$$M = \frac{Ft/A}{cc'/h}, \quad (1-8)$$

donde :

M = MODULO DE ELASTICIDAD

(MODULO DE TORSION O RIGIDEZ)

Una fatiga tensora (tracción) produce una deformación unitaria por tensión y un *Módulo de Rigidez*, mientras que una fatiga de compresión, un *Módulo de Compresibilidad*.

La experiencia ha demostrado que, para un mismo material, la deformación unitaria es la misma se trate de una fatiga compresora o tensora, o sea:

$$Y = \frac{\text{FATIGA TENSORA}}{\text{DEFORM. UNIT. POR TENSION}} = \frac{\text{FATIGA COMPRESORA}}{\text{DEFORM. UNIT. POR COMRES.}}$$

$$Y = \frac{Fn/A}{(L - L_0)/L_0} \quad (1-9)$$

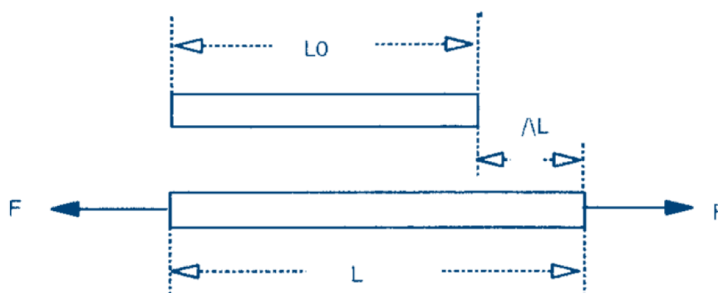
donde :
Y = MODULO DE YOUNG

El *Módulo de Young* se expresa, al igual que las fatigas, en DINAS/cm² o Kg/mm² en virtud de ser la deformación unitaria un número abstracto. En la Fig. 4, se muestra una deformación unitaria longitudinal para la cual es aplicable la fórmula (1-9).

En la Tabla 1 se resumen los distintos tipos de fatigas y las fórmulas relacionadas con ellas. En las Tablas 2 y 3 figuran algunos valores típicos de distintos módulos para sólidos y líquidos.

El coeficiente de compresibilidad para líquidos de la Tabla 2, es la inversa del módulo de compresibilidad definido por nosotros, se ha dado el mismo por ser el valor más frecuente de las tablas de constantes físicas de la bibliografía.

Fig. 4- Deformación unitaria longitudinal



Cuando una barra metálica es sometida a una tensión creciente según se muestra en la Fig. 5, la experimentación indica que desde 0 hasta el punto A, se cumple la ley de Hooke, siendo una recta. Si se retira la fuerza que motiva la fatiga, el material recobra su longitud primitiva, por lo que la mencionada sección se considera de *elasticidad perfecta*. Cualquier punto entre A y C, tal como el B, mostrará una elongación permanente al retirar la fuerza. En el punto C se producirá la rotura de la barra.

1.3.2. DEFINICION DE FLUIDO, VISCOSIDAD CINEMATICA

Con los elementos vistos podemos decir que un fluido es una sustancia que se deforma en forma continua constante y permanente cuando es sometida a un esfuerzo cortante, por pequeño que el mismo sea. Mientras que una sustancia elástica volverá a su posición inicial al suprimirse la fuerza, si no se sobrepasa cierto límite, denominado límite de elasticidad. Una tercer clase de sustancia, que necesita de la aplicación de una tensión de cortadura inicial para comenzar la deformación, esta representada por los plásticos, según puede observarse en la Fig. 6.

Si entre las placas en movimiento de los ejemplos anteriores existiese vacío en lugar de un liquido, la velocidad de deformación no resultaría constante sino uniformemente acelerada, si en su lugar colocamos un sólido abrasivo como la arena, necesitaríamos una

fuerza finita para mantener el movimiento en forma continua, no entrando ninguno de los casos en la definición de fluido.

TABLA 1 MODULOS DE ELASTICIDAD

TIPO DE FATIGA	FATIGA	DEFORMACION UNITARIA	MODULO DE ELASTICIDAD	NOMBRE DEL MODULO
TENSION	F_n/A	DL/L_0	$Y=F_n/A/DL/L_0$	DE YOUNG
COMPRESION	"	"	"	"
CORTANTE	F_t/A	$\text{tag} =$	$M=F_t/A/$	DE RIGIDEZ
PRESION	$p = F_n/A$	V/V_0	$B=p/ V/V_0$	DE COMPRESIBILIDAD
HIDROSTATICA				

TABLA 2. MODULOS DE ELASTICIDAD, VALORES TÍPICOS

MATERIAL/MODULO	YOUNG	RIGIDEZ	COMPRESIBILIDAD
ACERO	$9-21 \times 10^3$	8×10^8	16×10^3
ALUMINIO	7	2,5	7
BRONCE	9	3,5	6,2
COBRE	12	4	12
PLOMO	1,5	0,5	0,8

TABLA 3 COEFICIENTES DE COMPRESIBILIDAD DE LIQUIDOS

MATERIAL	Atm. ⁻¹
AGUA	50×10^{-6}
ALCOHOL ETÍLICO	112
GLICERINA	22
MERCURIO	3,8
SULFURO DE CARBONO	66

La Fig. 6, diagrama reológico (Reología; Mecánica de los cuerpos deformables) que vincula la velocidad de deformación con la tensión de cortadura, nos muestra las curvas típicas de los fluidos newtonianos y no newtonianos, donde podemos ver que los primeros cumplen con una relación lineal entre la tensión de cortadura y la velocidad de deformación. En ambos casos la función carece de ordenada al origen. Cuando se estudia la mecánica de los fluidos se habla de fluidos ideales, en el diagrama los mismos están representados por el eje de las ordenadas, por tener viscosidad nula. En el plástico ideal existe una cierta tensión inicial, vencida la cual comienza una deformación lineal constante.

La propiedad de los fluidos más utilizada y de mayor relevancia en los aspectos vinculados a los fenómenos tribológicos es la VISCOSIDAD, responsable de la resistencia que los fluidos oponen a las tensiones de cortadura o esfuerzos cortantes.

La viscosidad de un gas aumenta con la temperatura, mientras que la de los líquidos disminuye. Este comportamiento se atribuye a la vinculación entre la resistencia a la tensión de cortadura y la cohesión molecular. Al aumentar la temperatura en los líquidos disminuirá la cohesión y aumentará la transferencia de cantidad de movimiento de sus moléculas, disminuyendo correlativamente la viscosidad. En los gases, la resistencia depende más del movimiento de las moléculas que de las pequeñas fuerzas de cohesión existentes, como la temperatura incrementa los movimientos moleculares, paralelamente aumentará la viscosidad.

La ley de Newton nos permite dimensionar la viscosidad, operando con la fórmula 1-4:

$$\frac{F}{A} = \frac{U}{h},$$

$$\frac{F h}{A U} = \eta,$$

Según el sistema cgs:

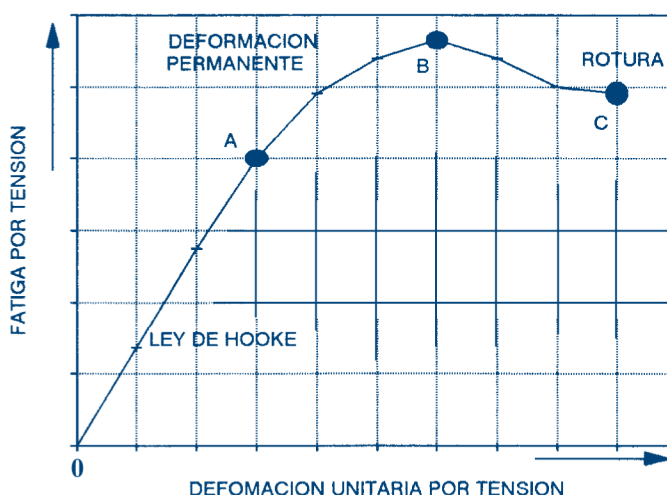
$$[F] = \text{DINA}$$

$$[L] = \text{cm}$$

$$[t] = \text{seg}$$

$$[\eta] = \frac{\text{DINA} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{cm}/\text{seg}} = \text{DINA} \cdot \text{seg} \cdot \text{cm}^{-2} = \text{gr} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1} \quad (1-10)$$

Fig. 5- Diagrama Fatiga - Deformación



En resumen podemos decir que la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la deformación que la misma produce en un fluido, denominada coeficiente de viscosidad o simplemente *viscosidad*, tiene como dimensiones $F L$ y t . (Con t se ha representado el tiempo, reservando T para Temperatura), o sea: $\text{DINA} \cdot \text{seg} \cdot \text{cm}^{-2}$, denominado POISE, que en el sistema *cgs* resulta $\text{gr} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1}$. Para pequeños valores de viscosidad se utiliza el CENTIPOISE (1 cp=0.01 poise), o el MICROPOISE (1 micro p=0.000001 poise)(8.30). En el Sistema Internacional (SI), adoptado en nuestro país por Ley 19511/72, la viscosidad dinámica resulta el *Newton* . *seg* . m^{-2} , igual a 10 poises.

La viscosidad definida por la ecuación (1-4), suele denominarse absoluta o dinámica, para diferenciarla de la viscosidad cinemática, que es el cociente de la viscosidad sobre la densidad del mismo material. Las dimensiones de la viscosidad cinemática son: $L(\text{cuadrado}) t(a \text{ la } -1)$, que en el sistema *cgs* se denomina STROKE (cm^2/seg).

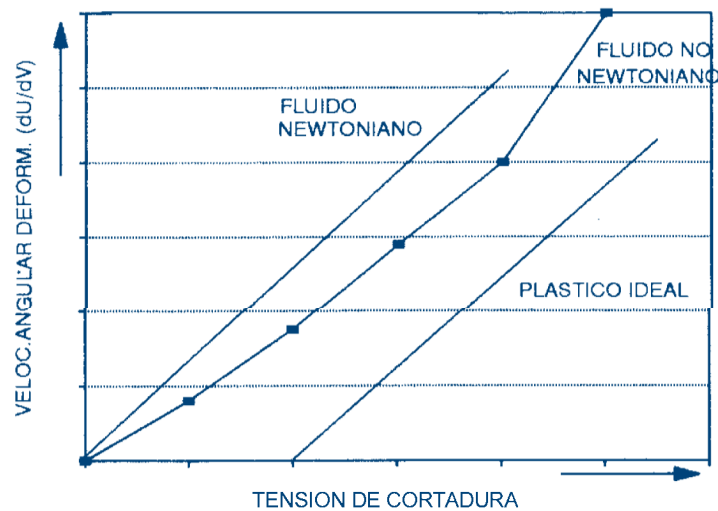
$$[\text{Viscosidad dinámica} / \text{Densidad}] = \text{gr} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{seg}^{-1} / \text{gr} \cdot \text{cm}^{-3} = \text{cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1} \text{ (Stoke)}$$

Las variaciones de la viscosidad con la presión pueden considerarse no significativas en el orden de presiones ordinarias, mientras que para grandes presiones puede esperarse algún comportamiento errático, aunque generalmente se produce un aumento de la misma.

En la práctica común de la lubricación, donde el uso de los aceites lubricantes minerales es el más extendido, la diferencia entre viscosidad absoluta y cinemática no es de mucha importancia, dado que las densidades de dichos aceites varían en las cercanías del 0.9.

Cuando se comenzó a hablar de fricción fluida o hidrodinámica se hizo referencia a la Fig. 2, donde las capas paralelas resultaban ser planas y de un largo tal que los fenómenos que ocurren en los extremos no afectarían el elemento de volumen bajo estudio. Consideremos ahora que doblamos las capas de tal forma de obtener dos cilindros concéntricos como los de la Fig. 7, estando el fluido encargado de reducir la fricción entre ambos cilindros. Evidentemente nos encontramos con un sistema conocido, denominado COJINETE CILINDRICO CONCENTRICO, que trabaja con un muñón cargado sobre un eje que gira ("journal bearing").

Fig. 6- Diagrama reológico



1.4. TEORIA HIDRODINAMICA DE LA LUBRICACIÓN

La condición de mantener separadas dos superficies opuestas por un "film" o película de lubricante, como en un cojinete, se denomina *hidrolubricación*. Cuando el cojinete es *cargado*, una cierta presión debe actuar para mantener esa separación, caso contrario las superficies se *apoyarán*. La forma de proveer la presión necesaria para mantener separadas las superficies define dos clases de hidrolubricación; hidrostática e hidrodinámica.

En la *lubricación hidrodinámica* la presión es auto generada por el movimiento relativo de las partes del mecanismo, como en el *cojinete cilíndrico concéntrico*. Cuando la presión es aplicada por algún ingenio externo al sistema, se dice que estamos frente a la lubricación hidrostática.

1.4.1. COJINETE CILINDRICO CONCENTRICO

La Fig. 7 muestra el cojinete cilíndrico, conformado por un aro de fricción y un muñón que recibirá la carga que deba soportar el mecanismo al cual sirve.

Si la velocidad de giro es lo bastante alta y la carga sobre el eje no muy grande, podemos considerar que el muñón quedará centrado en el cojinete y el espesor de la película será uniforme en toda la circunferencia. Nuestro elemento de volumen será ahora el aro de la Fig. 7, cuya cara interna superior estará apoyada en la parte rotante del cojinete y la externa en la superficie estática del mismo. Esta es una condición ideal, que nos permite hacer algunas deducciones sobre el comportamiento de la *película de espesor constante*.

En las condiciones indicadas trataremos de encontrar, para el sistema, la fuerza F que se debe aplicar para mantener una velocidad superficial U , la cupla o momento de fricción T

y la pérdida de potencia H o potencia consumida por la fricción y disipada en calor. La ecuación (1-4), ley de Newton, nos permite iniciar el trabajo:

$$\frac{F}{A} = \frac{U}{h},$$

Dado que:

$$A = DL$$

$$V = DN$$

Donde $N = \text{r.p.m.}$

$$H = C/2$$

Donde $C = \text{Luz} = D_2 - D_1$

$$F = \frac{DL \ DN}{C/2} = \frac{2 \ L \ D^2 \ N}{C} \ , \text{ que multiplicando por } \frac{D}{D}$$

$$F = 2 \ \left(\frac{D}{C}\right) \left(\frac{L}{D}\right) \ N \ D^2 \tag{1-11}$$

Las expresiones entre paréntesis en la ecuación (1-11), reflejan datos que generalmente son utilizados en la práctica, como las relaciones *longitud - diámetro* y *luz - diámetro* de un cojinete. Puede observarse que a constancia de otros factores, la fuerza es directamente proporcional a la viscosidad del fluido.

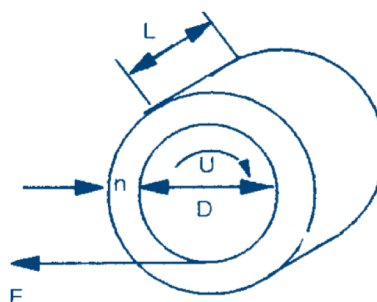
La cupla o momento de fricción se obtendrá multiplicando la fuerza por el radio ($D/2$):

$$T = 2 \ \left(\frac{D}{C}\right) \left(\frac{L}{D}\right) \ N \ D^3 \tag{1-12}$$

En el caso del cojinete cilíndrico, si consideramos uno en particular, o sea a constancia de factores geométricos, la cupla de fricción es proporcional a la viscosidad del lubricante y a la velocidad, revoluciones por minuto del eje. Si el lubricante y la velocidad son los factores constantes, la cupla es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional a la luz. La práctica diaria acostumbra a caracterizar los cojinetes por su diámetro interno, por lo tanto resulta de la ecuación (1-12) que la cupla es proporcional al tamaño del cojinete.

Por último, la pérdida de potencia, H , causante del aumento de temperatura de los cojinetes, resulta ser igual al trabajo hecho por unidad de tiempo contra la resistencia friccional:

Fig. 7- Película de lubricante en el interior del cojinete cilíndrico



$$H = w T = 2 \pi N T \quad , \quad (1-13)$$

Donde :

w = velocidad angular

La cupla de fricción debe tomarse con el diámetro de la parte móvil, en este caso, y generalmente, el muñón.

Sustituyendo la ecuación (1-12) en la (1-13), resulta:

$$H = 2 \pi^3 \left(\frac{D}{C}\right) \left(\frac{L}{D}\right) N^2 D^3 \quad , \quad (1-14)$$

Si en la ecuación (1-13) tomamos T en Kilográmetros y N en vueltas por segundo, resultará H en Kgm/seg, que dividido por 75 nos dará los HP de potencia consumidos.

Cuando estudiábamos la fricción seca y la fluida hablábamos de coeficientes de fricción, refiriéndonos a la relación entre la fuerza de fricción y la componente normal de la carga sobre la superficie. En el caso de rotación, el coeficiente será la relación entre la fuerza de fricción F y la carga total W , según:

$$f = \frac{F}{W} \quad ,$$

Como:

$$F = \frac{2T}{D} \quad ,$$

de las ecuaciones (1-11) y (1-12):

$$f = 2 \left(\frac{T}{DW}\right) \quad , \quad (1-15)$$

operando con las (1-13) y (1-15):

$$H = 2 \pi^3 N \cdot f D W/2 = f W \pi^2 D N \quad ,$$

como $\pi D N$ = velocidad

$$H = f W V \quad . \quad (1-16)$$

Donde V es la velocidad periférica.

Una manera alternativa de expresar el coeficiente de fricción resulta de sustituir la ecuación (1-12) en la (1-15):

$$f = 2 \left(\frac{T}{DW}\right) \quad ,$$

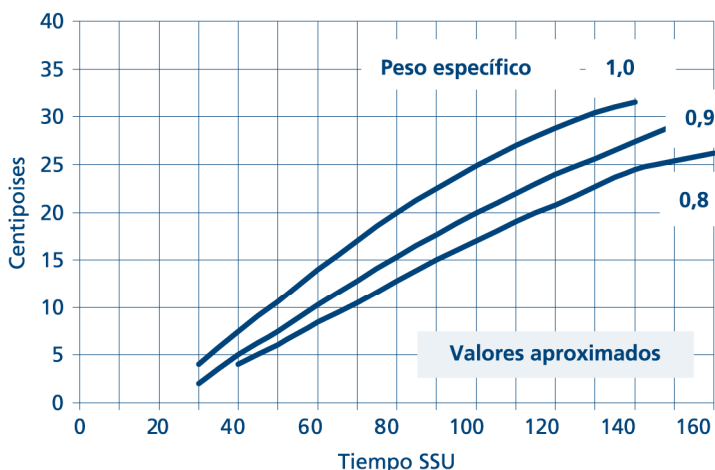
$$f = 2 \left(\frac{2 \pi^3 (D/C)(L/D) N^2 D^3}{DW}\right) \quad ,$$

haciendo $W/LD = P$ Donde:

P = superficie proyectada,

$$f = 2 \cdot \left(\frac{D}{C} \right) (\eta N/P) \quad (1-17)$$

Fig. 8- Conversión de viscosidades



EJEMPLO.- 2 Una máquina molidora tiene cojinetes cilíndricos con los siguientes datos:

LONGITUD	150 mm
DIÁMETRO	75 mm
LUZ	1 parte por mil

Las condiciones operativas de la máquina son:

VELOCIDAD	1200 rpm
CARGA S/	
2 COJINETES	650 Kg
TEMPERATURA DE PELÍCULA	38 °C
VISCOSIDAD DEL ACEITE	150 SSU (Segundos Saybolt Universal)
PESO ESPECIFICO DEL ACEITE	0.92

Calcular la cupla de fricción, la pérdida de potencia y el coeficiente de fricción en los cojinetes.

$$T = 2 \cdot \left(\frac{D}{C} \right) (L/D) N D^3 \quad (Fig. 8)$$

$$= 30 \text{ centipoise} = 0,3 \text{ poise}$$

$$[] = \text{DINA } \text{seg/cm}^2 = \text{gr-m cm/seg}^2 \text{ seg/cm}^2 =$$

$$= \text{gr-m /seg. cm} = 1.02 \times 10^{-2} \text{ Kg seg/m}^2$$

$$= 0.3 \times 1.02 \times 10^{-2} \times 10^{-4} \text{ Kg seg/cm}^2$$

$$D/C = 1000$$

$$L/D = 150/75 = 2$$

$$N = 1200 \text{ rpm} = 1200/60 \text{ seg}^{-1} = 20 \text{ seg}^{-1}$$

$$T = 3.14 \times 0.306 \times 10^6 \text{ kg seg. cm}^2 \times 1000 \times 2 \times 20 \text{ seg}^{-1} \times 7,5^3 \text{ cm}^3$$

$$T = 51 \text{ Kg cm}$$

$$\begin{aligned}
 T &= 0,51 \text{ Kgm} \\
 H &= 2 \quad NT = 2 \times 3.14 \times 20 \text{ seg}^{-1} \times 0.51 \text{ Kgm} = 64 \text{ Kgm seg}^{-1} \\
 H &= 64 / 75 \text{ HP} = 0.85 \text{ HP} \\
 0.85 \times 2 &= 1.70 \text{ HP} = 1 \text{ } 3/4 \text{ HP Total}
 \end{aligned}$$

$$H = 1 \text{ } 3/4 \text{ HP (aproximadamente),}$$

$$\begin{aligned}
 f &= 2 T / W D = 2 \times 0.5 \text{ Kgm} / 325 \text{ Kg} \times 0.075 \text{ m} = 0.043 \\
 f &= 0,043
 \end{aligned}$$

Si aplicáramos para el coeficiente de fricción la fórmula (1-17):

$$\begin{aligned}
 f &= 2 \sqrt{\frac{D}{C}} \frac{N/P}{\text{donde } P = W/LD = 325/7.5 \times 15 = 2.9 \text{ Kg/cm}^2} \\
 f &= \frac{2 \times 9.86 \times 1000 \times 0.3 \times 1.02 \times 10^{-6} \times 20 \text{ [Kg seg/cm}^2 \times \text{seg}^{-1}]}{2.9 \text{ [Kg/cm}^2]} = \\
 f &= 0,042
 \end{aligned}$$

En la bibliografía se encuentran tablas de conversión de viscosidades más completas y exactas que la utilizada en la resolución de este problema.

1.4.2. MECANICA DE LOS FLUIDOS

La parte de la mecánica que estudia los fluidos ha demostrado ser una de las más complicadas, siendo necesario hacer aquí algunas referencias dado que en la teoría de la lubricación se aplica intensivamente, principalmente si el objetivo del estudio es la investigación.

Cuando se habla de movimiento de fluidos en general, las propiedades de los mismos más utilizadas son la *densidad* y la *viscosidad*. Mientras que en conductos pequeños, o en pequeños chorros, puede ser necesario considerar la tensión superficial. La presión de vapor encuentra su utilidad máxima en las proximidades de los cambios de estado o sea en problemas técnicos que utilicen bajas presiones o altas temperaturas.

Utilizando la clásica división de la mecánica de los fluidos en *hidrostática* e *hidrodinámica*, diremos que la primera comprende el estudio de la presión y sus variaciones a través del fluido, como de las fuerzas normales debidas a la presión sobre superficies finitas. El hecho que las fuerzas resulten normales dada la falta de movimiento, implica que no habrá tensiones de cortadura y por lo tanto ninguna aplicación de la viscosidad durante su estudio.

La Fig. 9(a) representa una porción en forma de cuña del fluido contenido en un cilindro sometido a una fuerza por un pistón. El triángulo nos muestra una cara de la cuña. Si no consideramos el peso del fluido, las fuerzas que actúan sobre las caras de la cuña corresponden a las ejercidas por el resto del fluido y como se trata de ausencia de movimiento, estas serán normales. Como el fluido esta en equilibrio podemos poner:

$$\begin{aligned}
 F \text{ sen } a &= F_x & F \text{ cos } a &= F_y \\
 A \text{ sen } a &= A_x & A \text{ cos } a &= A_y
 \end{aligned}$$

Luego :

$$\frac{F}{A} = \frac{F_x}{A_x} = \frac{F_y}{A_y} = p \quad (1-18)$$

Que nos indica que la fuerza por unidad de superficie, o presión hidrostática, es igual en todas direcciones dentro del fluido, mas precisamente, que la fuerza que actúa sobre una superficie en el interior de un fluido es normal a la superficie, independientemente de la orientación de esta.

Generalizando la (1-18) para un diferencial de A:

$$p = \frac{dF}{dA} \quad , \quad dF = p \, dA \quad (1-19)$$

Sin embargo en la misma forma que la presión atmosférica disminuye con la altura, la presión en el interior de los mares disminuye al aumentar la distancia con respecto al fondo. En la Fig. 9(b), se ha representado un elemento de volumen dentro del fluido, de forma de hallar la relación entre la presión en cualquier punto y la distancia al fondo del recipiente.

Si el fluido esta en equilibrio:

$$\text{SUMA } F_y = 0 \quad ;$$

$$dw = \rho \, g \, A \, dy \quad ;$$

Donde :

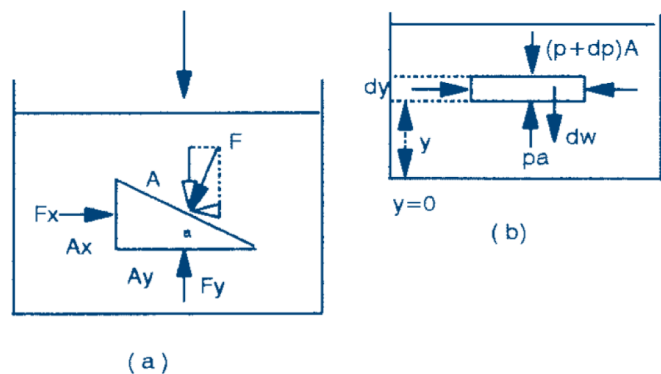
ρ = densidad

g = aceleración de la gravedad

$$p \, A - (p + dp) \, A - \rho \, g \, A \, dy = 0 \quad ;$$

$$\frac{dp}{dy} = - \rho \, g \quad (1-20)$$

Fig. 9- Presión hidrostática



La ecuación (1-20) relaciona las variaciones de la presión con la altura y con el peso específico para los fluidos y generalmente se escribe:

$$p = \rho \, g \, h \quad (1-21)$$

Donde

$\rho \, g$ = peso específico

$h = -y$ = distancia vertical con respecto a la referencia

$$\text{TRABAJO NETO} = p_1 A_1 l_1 - p_2 A_2 l_2$$

Como los volúmenes V_1 y V_2 son iguales (fluido incompresible) y si la densidad del fluido es ρ y su masa m :

$$A_1 l_1 = A_2 l_2 = \frac{m}{\rho};$$

$$\text{TRABAJO NETO} = (p_1 - p_2) \frac{m}{\rho}, \quad (1-22)$$

El incremento de la energía cinética del sistema será:

$$\text{INCREM. ENER. CINÉTICA} = \frac{1}{2} m u_2^2 - \frac{1}{2} m u_1^2, \quad (1-23)$$

Donde :
 u = velocidad

Si las alturas de los volúmenes V_1 y V_2 fueran distintas con respecto a una línea de referencia, habría un incremento de energía potencial gravitatoria:

$$\text{INCREM. ENERGIA POTENCIAL} = m g y_2 - m g y_1, \quad (1-24)$$

El trabajo neto (1-22) lo podemos igualar a los incrementos de energía (1-23)(1-24):

$$(p_1 - p_2) \frac{m}{\rho} = \left(\frac{1}{2} m u_2^2 - \frac{1}{2} m u_1^2 \right) + (m g y_2 - m g y_1); \quad (1-25)$$

Dividiendo por $m \cdot g$:

$$\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = \frac{u_2^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} + y_2 - y_1,$$

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + y_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + y_2,$$

Dado que los puntos 1 y 2 representan a cualquiera de los situados dentro del tubo, podemos escribir:

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + y = \text{CONSTANTE} \quad (1-26)$$

La ecuación (1-26) es una de las formas que puede tomar el *teorema de Bernoulli*.

La presión p es absoluta y considerando a la densidad en unidades homogéneas, la (1-26) resulta tener todos sus términos con la dimensión de longitud (L). Por este hecho en la técnica se denomina a cada uno de los mismos *alturas*; de presión, de velocidad y de cota respectivamente.

De la Fig. 10 deducimos otra propiedad de los fluidos ideales, conocida como *ecuación de continuidad*, que nos explica el aumento de velocidad con la disminución de la sección:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = A V = \text{CONSTANTE} \quad (1-27)$$

1.4.3. FLUIDOS REALES, NUMERO DE REYNOLDS

Si hacemos intervenir la viscosidad en los fenómenos de movimiento de los fluidos, o sea nos apartamos del concepto de fluido ideal, el movimiento será laminar solo a bajas velocidades, mientras que sobrepasada una velocidad crítica se transforma en turbulento. El perfil de velocidad para cada uno de los casos, a saber: movimiento de un fluido ideal, laminar y turbulento, se han representado en la Fig. 11.

El balance total de energía por unidad de tiempo, para un fluido real que circula por un conducto tal como lo indica la Fig. 12, puede escribirse:

$$E_a + m X a \frac{g}{g_c} + m P a v_a + \frac{m U a^2}{2 g_c} + Q =$$

$$= E_b + m X b \frac{g}{g_c} + m P b v_b + \frac{m U b^2}{2 g_c} + F + W \quad (1-28)$$

Donde :

E = Energía interna

m = Masa

g/g_c = Aceleración de la gravedad local/valor numérico normal

P = Presión

v = Volumen

U = Velocidad

F = Trabajo contra la fricción

Q = Calor entregado al sistema

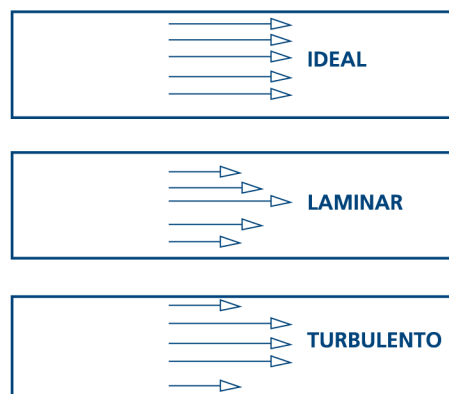
W = Trabajo entregado por el sistema

X = Distancia a la referencia

En la técnica se omite g/g_c por ser próxima a la unidad. La *energía interna* es inherente a los cuerpos de cada sistema, siendo desconocida en forma absoluta, por lo cual se establecen planos donde se la supone igual a cero (0°C en ingeniería). El símbolo E se utiliza para representar aquella porción de la energía interna afectada por la temperatura, que en realidad es una diferencia con respecto al plano de referencia o con respecto a dos estados del sistema (DE).

La determinación del valor F de la (1-28) es un ejemplo de la utilización de métodos experimentales en la técnica. La definición de la relación entre las variables se puede hacer utilizando como herramienta el *análisis dimensional*, mientras que la experimentación nos dirá si dicha relación puede ser expresada por una fórmula o por una gráfica.

Fig. 11- Regímenes de circulación en tuberías



El análisis dimensional se aplica a problemas en los que intervienen muchas variables, surgidos generalmente de datos empíricos. Los profesionales se encuentran en su trabajo con ecuaciones dimensionales, que dan números con dimensión al ser resueltas y con ecuaciones adimensionales, que dan números sin dimensión como resultado.

El cuarto término de la (1-28), la altura de velocidad por unidad de masa (energía cinética), es un número dimensional, según:

$$U^2 / 2gc = \frac{U^2}{2m g/F}$$

Dado que:

$$[F] = K mg$$

$$[F] = 1/gc mg$$

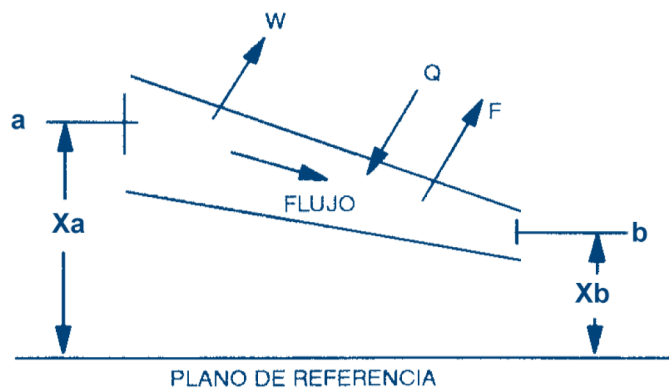
$$[gc] = m g/F$$

$$[\text{ENERG. CIN}] = [L^2 / t^2] / [mL / t^2 F] = \text{CON DIMENSION}$$

Si dividimos la altura de velocidad por la altura de cota:

$$[[U^2 / 2gc] / [X g/gc]] = [L^2 / t^2] / [mL / t^2 F] / [L^2 / t^2] / [mL / t^2 F] = \text{ADIMENSIONAL}$$

Fig. 12- Flujo de un fluido ideal



La experiencia indica que el paso de régimen laminar a turbulento es una función de factores que determinan un número adimensional. El método denominado de los siete pasos resulta adecuado para intentar hallar la relación mencionada, pasándose a continuación a su aplicación.

PASO 1, REUNIR LAS VARIABLES

En este paso se deberán reunir aquellas variables que se estima influyen en el balance de energía de fluidos circulando por tuberías lisas, en flujo isotérmico.

VARIABLE	SÍMBOLO	DIMENSIONES *
PERDIDA PRESION DEBIDA A LA FRICCION	P	m/Lt ²
DIAMETRO INTERIOR DEL TUBO	D	L
LARGO DEL TUBO	L	L
DENSIDAD DEL FLUIDO		m/L ³
VISCOSIDAD DEL FLUIDO		m/Lt
VELOCIDAD DE FLUIDO	u	L/t

* Sistema absoluto (m,L,t,T)

PASO 2, FORMA EXPONENCIAL DE LAS VARIABLES

Las variables del *paso 1* serán llevadas a una forma exponencial e igualadas a un número sin dimensiones.

$$N = (D)^a (L)^b (\rho)^c (\mu)^d (u)^e (DP)^f \quad (1-29)$$

PASO 3, SUBSTITUIR LAS VARIABLES

En la (1-29) cada variable será reemplazada por su correspondiente dimensión.

$$N = (L)^a (L)^b (m/L^3)^c (m/Lt)^d (L/t)^e (m/Lt)^{2f} \quad (1-30)$$

PASO 4, SUMAR LOS EXPONENTES

Determinamos en cada miembro de la ecuación (1-30) la suma de exponentes por dimensión, igualando luego las sumas a cero.

SUMAS DE EXPONENTES DE	m	$=$	$c + d + f = 0$
" "	"	$=$	$a + b - 3c - d + e - f = 0$
" "	"	$=$	$-d - e - 2f = 0$

La suma de los exponentes de las dimensiones debe dar cero, por cuanto la ecuación (1-30) es homogénea y está igualada a un número sin dimensiones.

PASO 5, REDUCIR NUMERO DE EXPONENTES

El *teorema de Buckingham*, o teorema Pi, (E. Buckingham 1913) dice que en un problema físico en que intervengan n magnitudes, con m dimensiones, las n magnitudes pueden agruparse en $n-m$ *grupos adimensionales*. En nuestro caso tendremos $6-3 = 3$ grupos.

Como aparecerán tres grupos adimensionales el número de exponentes debe ser reducido a tres, con lo que estaremos buscando una ecuación de la forma:

$$N = (\text{GRUPO SIN DIMENSIÓN-1})^{ex1} \cdot (G S D-2)^{ex2} \cdot (G S D-3)^{ex3}$$

En este paso 5 debemos hallar los exponentes 1, 2 y 3.

Cada problema a resolver es un caso particular, se supone que el operador del método ha experimentado con las variables, e incluso ha tratado métodos matemáticos de correlación. Llegado a la etapa del análisis dimensional y al paso actual, aplicará sus conocimientos sobre el caso para tomar las decisiones de opción a que está obligado. El tema es: ¿con que exponentes nos quedaremos?, dado que debemos eliminar tres.

La primera consideración es que ΔP es conveniente que aparezca una sola vez en la solución final, dado que es parte de lo que estamos buscando. La elección de las otras dos variables es arbitraria y responde tanto a la experiencia previa en el sistema, como a prueba y error.

La experiencia indica que ΔP es proporcional a la primera potencia del largo del tubo L , puesto que se duplica al duplicarse tal longitud. Esta es una buena razón para incorporar L una sola vez a la fórmula. La otra puede ser la viscosidad, conocida su influencia fundamental en los fenómenos de fricción.

De acuerdo a lo anterior, optamos por resolver las ecuaciones simultáneas del paso 4 en términos de f , d y b , según:

$$\begin{aligned} e &= -d - 2f \\ c &= -d - f \\ a &= -b - d \end{aligned}$$

PASO 6, SUBSTITUIR POR LOS NUEVOS EXPONENTES

Los nuevos exponentes del paso 5 los colocamos en la ecuación (1-29).

$$N = (D)^{b-d} (L)^b (\mu)^{d-f} (\rho)^d (u)^{d-2f} (\Delta P)^f,$$

PASO 7, REUNIR VARIABLES CON IGUAL EXPONENTE

$$N = (L/D)^b (\mu/Du)^d (\Delta P/u^2)^f,$$

Dividiendo todos los exponentes por f y reordenando:

$$N'(\Delta P/u^2) = (L/D)^{-(b/f)} (\mu/Du)^{-(d/f)},$$

La elección del exponente de L en el Paso 5 se justificó en :

$$-(b/f) = 1,$$

a igualdad de otras condiciones. Luego:

$$PD/Lu^2 = 1/N' (Du/\mu)^{f/d}$$

Que podemos darle la forma :

$$PD/Lu^2 = F(Du/\mu),$$

Donde:

$$PD/Lu^2 = f \text{ (factor de fricción)}$$

$$Du/\mu = Re \text{ (Número de Reynolds)}$$

En forma general podemos escribir:

$$f = F(Re).$$

La determinación de la relación entre el *Número de Reynolds* y el *factor de fricción* ha sido objeto de numerosos estudios, tomándose en consideración distintas calidades de interiores de tubos, como de los materiales de los cuales están compuestos.

La Fig. 14 muestra cualitativamente la forma de esta relación (gráfico log-log), indicándose en la misma que para Re menores de 2000 el flujo es laminar y por sobre 4000, turbulento, encontrándose regímenes de transición entre ellos(8.63).

Resulta destacable que mientras en la zona de régimen laminar la fricción o resistencia al movimiento es independiente de la rugosidad del material, en el régimen turbulento es función de la misma.

Una relación aproximada entre el *factor de fricción* y el *Número de Reynolds* para uso en la técnica en cañerías lisas, puede ser:

$$f = \frac{0,046}{Re^{0,2}}$$

En la lubricación hidrodinámica, bajo condiciones de carga y velocidad que resulten en movimiento en régimen laminar, se facilitara la formación de la película o "film" y la resistencia o fricción será, principalmente, una función de la viscosidad del lubricante. Toda condición que afecte la película de lubricante, hará intervenir a las superficies en el sistema, resultando más convenientes a la duración del mecanismo un buen estado de pulido de las mismas.

1.4.4. LAS SUPERFICIES

Cuando hablamos de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico, nos referíamos a la fuerza necesaria para iniciar el movimiento y para luego mantenerlo. Esa fuerza es función del estado de pulimento de las superficies. En la condición de régimen turbulento, las superficies también intervienen en la fricción en la lubricación hidrodinámica.

Las superficies preparadas para mantener un cierto mecanismo en roce permanente, separadas por un "film" lubricante, reciben un tratamiento especial en la composición química y estado de pulimento de acuerdo al uso específico para el cual son diseñadas. La composición será tratada más adelante, en cuanto al estado de pulimento, este hace al costo y al grado de tecnología y *reglas del arte* aplicadas para conseguirlo.

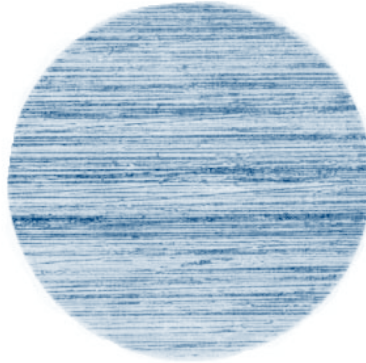
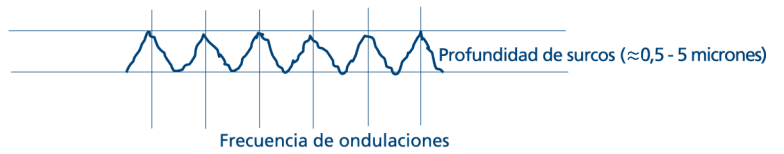
El mecanizado de las superficies agrega a las naturales perturbaciones que estas detentan, profundos cambios estructurales productos de la presión y temperatura a que son sometidas. Ya se trate de máquinas herramientas cortantes o muelas abrasivas, estas destruyen la capa superficial del metal sometido a tratamiento, transforman parte de los cristales en materiales amorfos y modifican las características del metal original. La temperatura y la presencia de aire producen formación de óxidos del metal, que se incorporan a la superficie. La afectación llega a ser profunda, produciendo cambios en las capas próximas a la superficie.

Cualquiera sea el método de maquinado utilizado, se formaran surcos o estrías, tipo ondas, con una frecuencia y amplitud dependiente de las herramientas pulidoras. El grado de finura del acabado de la superficie dependerá de la tecnología puesta en práctica. El estado final de la superficie se controlará por microfotografías, resultando los parámetros a considerar la profundidad del surco y la frecuencia de salientes, que se minimizaran en un buen acabado. Superficies con poca rugosidad podrán ser lubricadas con capas finas de lubricante, de menor viscosidad y por lo tanto con menor pérdida de energía en el movimiento, en cambio superficies rugosas requerirán capas mayores, mayores viscosidades y más esfuerzo para lograr el movimiento.

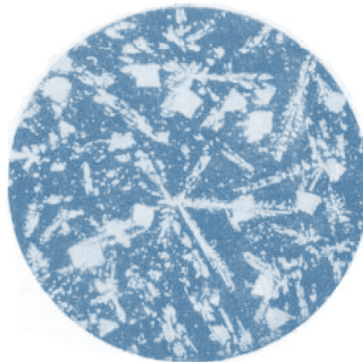
En el caso de cañerías la *rugosidad relativa* de la Fig. 14 se refiere al cociente λ/D , donde λ representa la profundidad de la rugosidad y D el diámetro de la cañería.

Tomadas de la bibliografía, (8.53) en la Fig. 13, se muestran microfotografías de probetas, una esmerilada con esmeril número 240 a 200 aumentos (a) y otra de un metal blanco antifricción antes del mecanizado a 100x (b).

Fig. 13- Fotografías microscópicas de superficies metálicas



(a).- Probeta desbastada con esmeril 240, 200 aumentos.



(b) Superficie de un metal blanco para cojinetes (85% Sn, 7,5% Sb, 7,5% Cu). Se observan: Cristales mixtos, cúbicos, correspondientes a combinaciones de SbSn. Agujas de Cu3Sb. Los cristales están incluidos en una matriz plástica de solución sólida. 100 aumentos.

1.4.5. LEY DE POISEUILLE

En un tubo circular recto, con un flujo de líquido en régimen laminar y permanente, como el mostrado en la Fig. 15, la distribución de velocidades, el caudal y la caída de presión, pueden determinarse analíticamente por la ecuación de *Poiseuille*(1840).

Partiremos de la ley de Newton:

$$\begin{aligned} \text{TENSION DE CORTE} &= \eta \text{ REGIMEN DE CORTE (Ecuación 1-4)} \\ \text{TENSION DE CORTE} &= \text{FUERZA} / \text{AREA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{FUERZA} &= y^2 dp \quad , \\ \text{AREA} &= 2 y dL \quad , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TENSION DE CORTE} &= y/2 (dp/dL) \quad , \\ \text{REGIMEN DE CORTE} &= du/dy \quad , \\ y/2 (dp/dL) &= (du/dy) \quad , \\ du &= 1/2 (dp/dL) y dy \quad , \end{aligned} \tag{1-31}$$

$$u = \frac{1}{2} \left(\frac{P}{L} \right) \int_{y=r}^{y=r_0} y dy ,$$

$$u = \frac{1}{2} \left(\frac{P}{L} \right) (r_0^2 - r^2) / 2$$

CAUDAL = VELOCIDAD . SECCION

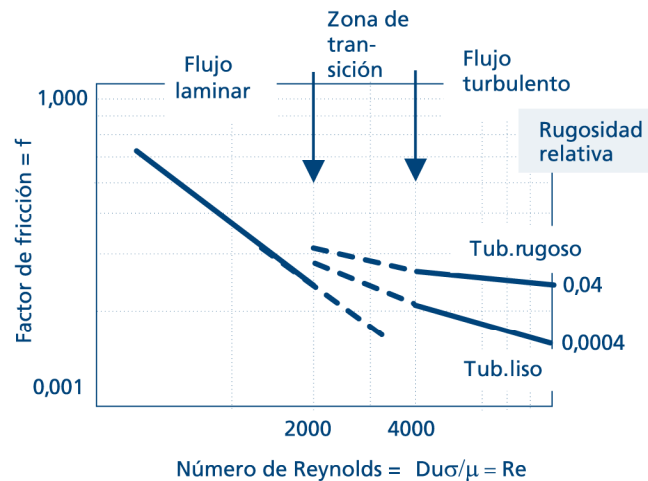
$$Q = \frac{1}{4} \left(\frac{P}{L} \right) (r_0^2 - r^2) \int_0^{r_0} r dr$$

$$Q = \frac{r}{2} \left(\frac{P}{L} \right) \int_0^{r_0} (r_0^2 - r^2) r dr$$

$$Q = \left(\frac{1}{8} \right) \left(\frac{P}{L} \right) r_0^4$$

$$Q = \frac{Pr^4}{8L} \quad (1-32)$$

Fig. 14- Número de Reynolds

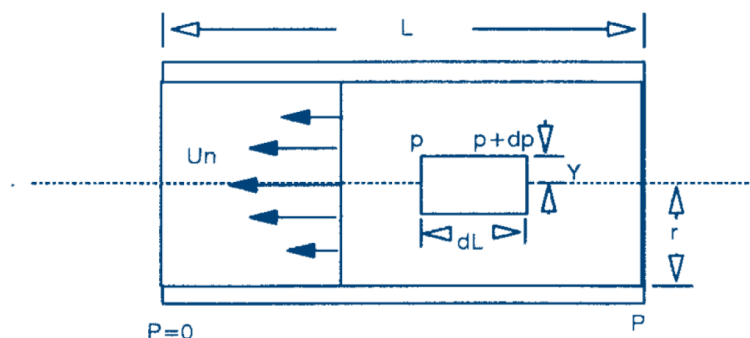


La ecuación (1-32) representa la forma más corriente de la ecuación de Poiseuille (Hagen-Poiseuille), la que es utilizada en uno de los métodos de determinación de la viscosidad.

1.4.6. PELICULA DE ESPESOR NO UNIFORME

La Fig. 16 muestra las posiciones que adopta un cojinete cilíndrico, girando en el sentido de las agujas del reloj, bajo tres condiciones distintas: fricción seca, lubricación ideal y real. En el primer caso el muñón, elemento girante y que soporta la carga w , trepará sobre la cara estática del cojinete hasta que la fuerza de fricción sea compensada por la componente tangencial de w , quedando formando un ángulo α con la dirección de la carga. La fricción (F), como en las ecuaciones (1-2) y (1-3), será proporcional a la componente normal de la carga, que en este caso es radial pasando por el punto de contacto metal - metal. La constante de proporcionalidad, el coeficiente de fricción f , se denomina ahora de *resbalamiento* y cumplirá:

Fig. 15- Ley de Poiseuille, caída de presión y distribución de velocidad en tubo circular recto



$$F = f N$$

(1-33)

El desplazamiento ocurre en el sentido opuesto al movimiento del muñón, denominándose a la distancia (*o-ó*) *excentricidad*.

La lubricación ideal ocurre cuando, como en el caso visto en la Fig. 7, se suponen condiciones de velocidad y carga que no producen *excentricidad*, formándose una capa uniforme de lubricante. La realidad la compone el tercer caso, donde existe una *excentricidad* *e*, donde habrá un desplazamiento en el sentido del movimiento del muñón, donde la luz será variable desde un mínimo en el máximo acercamiento, hasta un máximo en el lado opuesto. Como resultado de todo esto, la película de lubricante tendrá *espesor variable*.

El desplazamiento en el sentido del movimiento se produce por la distribución de la presión generada por el muñón girando, que como una bomba centrífuga impulsa al lubricante contra la reducción de sección que la carga *w* provocó en la luz. En este caso *w* deberá equilibrar este diferencial de presión a ambos lados del estrechamiento.

En la figura se ha colocado una alimentación permanente de lubricante, en la parte superior del cojinete, *Q*, que será un caudal en unidades de lubricante por unidad de tiempo. El lubricante agregado está vinculado a la reposición por pérdidas laterales, no influyendo en el juego de presiones, manteniéndose como lubricación hidrodinámica

Los cojinetes de la Fig. 16 se denominan plenos, por tener su geometría circular completa en la sección. Si se eliminara la mitad superior del cojinete, no variaría la capacidad de carga y disminuiría la fricción de la parte superior. Estos cojinetes se denominan parciales, siendo más eficientes en determinadas condiciones de carga y velocidad, presentando dudas en cuanto a la seguridad de no contaminar el aceite.

La presión positiva generada en la parte convergente de la película de espesor no uniforme, será la encargada de mantener flotante el muñón y evitar el contacto metal - metal.

1.4.7. ECUACION DE REYNOLDS - DISTRIBUCION DE PRESION

La Fig. 17 representa un elemento de volumen de la película de lubricante de espesor variable de un cojinete, supuesto plano a los efectos de la demostración, sobre el que se aplicarán las ecuaciones del flujo laminar.

Las fuerzas que actúan sobre el elemento serán:

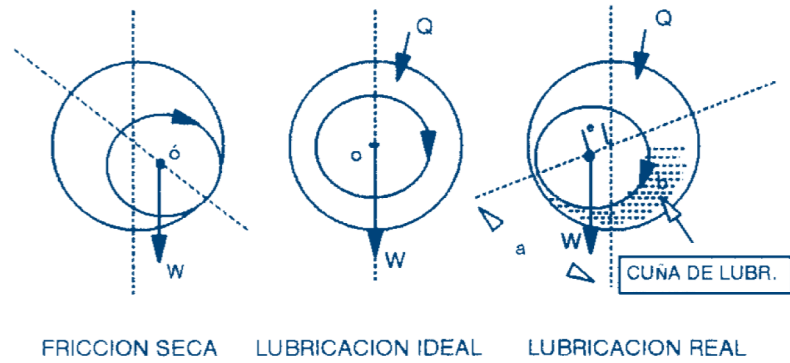
$$F_1 = p \, dy \, dz \quad \text{dado que } P = F/\text{Sup.}$$

$$F_2 = (p + dp) \, dy \, dz$$

$$F_3 = S \, dx \, dz \quad \text{dado que } S = F/A \text{ (ecuación 1-4)}$$

$$F_4 = (S + dS) \, dx \, dy$$

Fig. 16- Cojinete cilíndrico, excentricidad



La distribución de velocidades de la Fig. 17 explica porque la fuerza F_4 acompaña al movimiento, mientras la F_3 se opone. Siendo una fuerza proveniente de una tensión de corte, la superficie inferior ($dx dz$) es *frenada* por la anterior de menor velocidad, mientras que la superior es *arrastrada* por la de arriba de mayor velocidad.

En el equilibrio se cumplirá:

$$F = 0$$

$$p dy dz - (p + dp) dy dz - S dx dz + (S + dS) dx dz = 0$$

$$dp dy = dS dx$$

$$dS / dy = dp / dx$$

Como se puede observar la presión varía en la dirección x , mientras que la tensión de cortadura lo hace en la dirección y . Tomando como constante a dp/dx , integrando con respecto a y se tendrá:

$$dS / dy = dp / dx \quad \text{como : } S = \mu du / dy$$

$$d^2 u / dy^2 = (dp / dx) \quad \text{tomando a } (dp / dx) = \text{constante}$$

$$(d^2 u / dy^2) dy = (dp / dx) dy + A ,$$

$$du / dy = (dp / dx) y + A , \tag{1-34}$$

$$(du / dy) dy = (dp / dx) y dy + A dy + B ,$$

$$u = (dp / dx) y^2 / 2 + Ay + B , \tag{1-35}$$

como : $y = 0 \mid y = h$
 $u = 0 \mid u = U$

$$\left. \begin{array}{l} y=0 \\ u=0 \end{array} \right| B = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} y=h \\ u=U \end{array} \right| U = (dp / dx) h^2 / 2 + Ah ,$$

$$A = U / h - (dp / dx) h / 2 , \tag{1-36}$$

Reemplazando la (1-35) en la (1-34):

$$du/dy = S = (dp/dy) y + U/h - (dp/dx) h/2 \quad ,$$

$$S = U/h + (dp/dx) (y - h/2) \quad . \quad (1-37)$$

La (1-37) es una de las formas de la ecuación de Reynolds para calcular la tensión de corte en cualquier punto del fluido. Dado que si $y = h$, se trata de la tensión de corte en la superficie móvil S' , podemos escribir :

$$S' = U/h + (dp/dx) h/2 \quad . \quad (1-38)$$

Mientras que para la superficie estática S° donde $y = 0$:

$$S^\circ = U/h - (dp/dx) h/2 \quad . \quad (1-39)$$

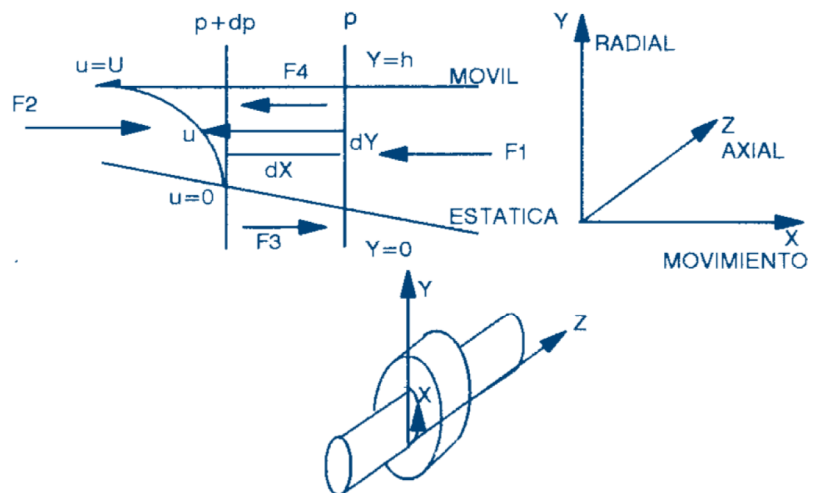
En la Fig. 18 se ha representado la ecuación de Reynolds basándose en dos curvas componentes, la distribución de velocidades $u1$, corresponde a la distribución lineal derivada de la ecuación de Newton para superficies en movimiento relativo, sin diferencial de presión. Mientras que la $u2$ responde a la presencia de un gradiente de presión sin movimiento de las superficies contenedoras de la capa de lubricante, como el transporte de fluidos en tuberías estudiados por Poiseuille, ecuación (1-31).

La (1-35) nos permite encontrar la velocidad, reemplazando A por su valor y operando:

$$u = (dp/dx) y^2 / 2 + (Uy/h) - (dp/dx) hy/2 \quad ,$$

$$u = Uy/h + y/2 (dp/dx) (y-h) \quad . \quad (1-40)$$

Fig. 17- Presión y distribución de velocidad en película de espesor variable



Como caudal es velocidad por sección, resultará:

$$Q = \int u \, dy \, dz \quad ,$$

En condiciones de operación permanente, con U y h constantes en cualquier punto con respecto al tiempo, considerando al lubricante incomprensible, la ecuación de continuidad (1-27) nos permite derivar la ecuación general de la teoría hidrodinámica de la lubricación.

Utilizamos el elemento de volumen de la Fig. 17, de base $dx \, dz$ y altura h , o sea el

elemento $dx dz$, llamando Q_x al caudal que entra al elemento en la dirección del flujo, Q_x' al que sale en la misma dirección. En la dirección z llamamos Q_z al caudal entrante y Q_z' al saliente, por la ecuación de continuidad :

$$\begin{aligned} Q_x' + Q_z' &= Q_x + Q_z \quad , \\ Q_x' &= Q_x + (DQ_x/Dx) dx \quad , \\ Q_z' &= Q_z + (DQ_z/Dx) dz \quad , \end{aligned}$$

$$(DQ_x/Dx) dx + (DQ_z/Dz) dz = 0 \quad . \quad (1-41)$$

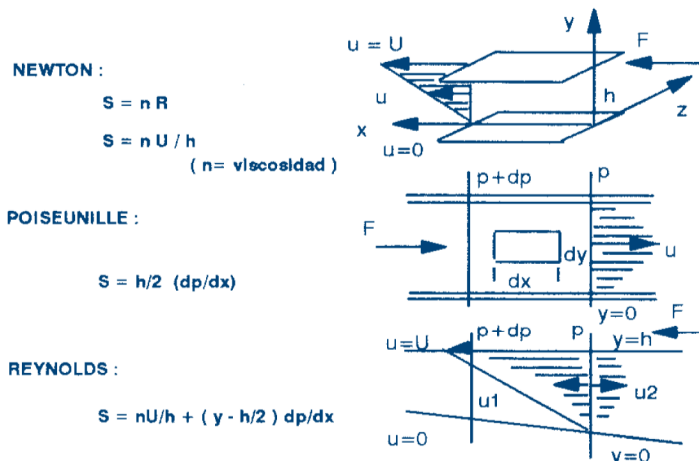
Los caudales Q los encontramos integrando la velocidad (1-40) entre $y=0, y=h$, según :

$$Q = \int_{y=0}^{y=h} U y/h + y/2 (dp/dx) (y-h) dy \quad . \quad (1-42)$$

La distribución geométrica que hemos acordado para nuestro elemento de volumen, según la Fig. 17, como las distintas convenciones establecidas, hacen que los incrementos de presión sean positivos en el sentido de circulación. La velocidad debida a la aplicación de la ecuación de Newton de la tensión de corte, debe ser mayor que la correspondiente a la ley de Poiseuille a los efectos de posibilitar ese sentido de circulación. Integrando para el caudal entrante en x :

$$\begin{aligned} Q_x &= \int_{y=0}^{y=h} U/h y dy + \int_{y=0}^{y=h} (dp/dx) 1/2 y^2 dy - \int_{y=0}^{y=h} (dp/dx) h/2 y dy \quad , \\ Q_x &= \left[U/h y^2 /2 \right]_{y=0}^{y=h} + (dp/dx) 1/2 y^3 /3 \left[\right]_{y=0}^{y=h} - (dp/dx) h/2 y^2 /2 \left[\right]_{y=0}^{y=h} \quad , \\ Q_x &= Uh/2 - h^3 /12 (dp/dx) \quad . \quad (1-43) \end{aligned}$$

Fig. 18- Composición de la fórmula de Reynolds, película de espesor variable



El primer termino de la (1-43), es la velocidad media en el sentido de la circulación, $U/2$, multiplicada por el área de entrada al elemento por la x (hdz , donde no se ha indicado dz por simplicidad). El segundo término corresponde a la distribución parabólica u_2 de la Fig. 18. En la dirección z no existe movimiento relativo de las superficies, correspondiendo la circulación de lubricante en esa dirección a las pérdidas del mismo fuera del cojinete. En esa dirección podemos escribir:

$$Q_z = - \frac{h^3}{12\eta} \left(\frac{dp}{dz} \right) \quad (1-44)$$

Reemplazando las (1-43) y (1-44) en la (1-41):

$$D/Dx \left(\frac{h^3}{12} \frac{Dp}{Dx} \right) + D/Dz \left(\frac{h^3}{12} \frac{Dp}{Dz} \right) = U/2 \frac{Dh}{Dx} \quad (1-45)$$

La (1-45) es una de las formas de la ecuación de Reynolds para la distribución de presión en la película. Su integración requiere el conocimiento de la variación del espesor de la película con x , de las pérdidas laterales y de la variación de la viscosidad con la presión. Suponiendo pérdidas laterales despreciables y viscosidad constante, por integración de la (1-45) tendremos:

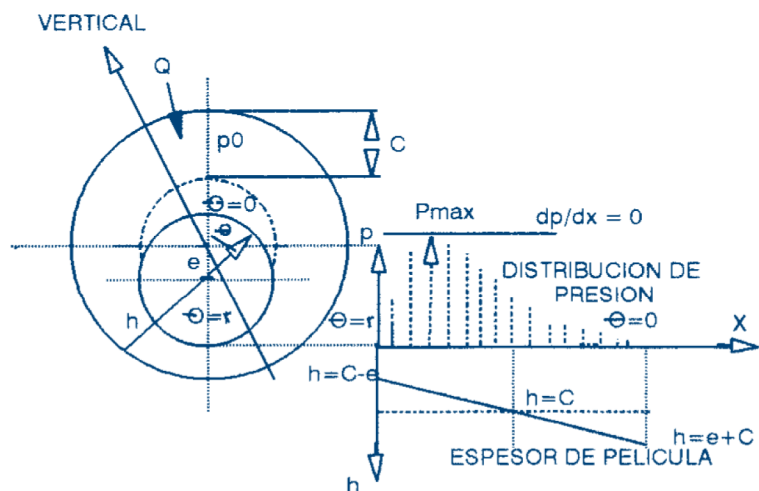
$$\begin{aligned} \left(\frac{dp}{dx} \right) / 12 \frac{d}{dx} \left(h^3 \right) &= U/2 \frac{dh}{dx} \\ U h / 2 &= \left(\frac{dp}{dx} \right) h^3 / 12 + A \end{aligned}$$

La constante de integración se puede calcular buscando un valor de h conocido, tal como h_1 , donde (dp/dx) es igual a cero, o sea el punto de máxima presión, donde la tangente a la curva se hace paralela a x , como se muestra en la Fig. 19.

$$\begin{aligned} U h_1 / 2 &= A \\ \left(\frac{dp}{dx} \right) h^3 / 12 &= U h / 2 - U h_1 / 2 \\ \left(\frac{dp}{dx} \right) &= 6U \frac{(h-h_1)}{h^3} \quad (1-46) \end{aligned}$$

Considerando a las superficies planas, h es una función lineal de x y p , siendo esta última la presión hidrostática en cualquier punto de la película.

Fig. 19- Espesor de película en función del ángulo de giro del muñon y la excentricidad



1.4.8. TEORIA DE SOMMERFELD

El principal mérito de Sommerfeld corresponde a la integración de la ecuación de Reynolds para todos los valores de la excentricidad. Manteniendo el supuesto de pérdida lateral despreciable, comenzamos haciendo a x una función de q , según $x=rq$, la (1-46) resulta:

$$\left(\frac{dp}{dq} \right) = 6U \frac{r(h-h_1)}{h^3} \quad (1-47)$$

Siendo $\theta = 0$ en el punto de máximo espesor de película, respetando las notaciones de la Fig. 19, resultará:

$$\begin{aligned} h &= c + e \cos\theta, \\ h/e &= c/e + \cos\theta, \quad \text{si } c/e = a \\ h/e &= a + \cos\theta, \\ h &= e (a + \cos\theta). \end{aligned} \quad (1-48)$$

Puede observarse de la Fig. 19 que si $c = e$, $a = 1$ y por tanto $h=c+e$, corresponderá, para la excentricidad dada, al punto de máxima separación. Si $e = 0$ será $h = c$, estando el cojinete concéntrico. Si $\theta = 90^\circ$, $h = c$ en la excentricidad.

Reemplazando en la (1-47) la (1-48), resultará:

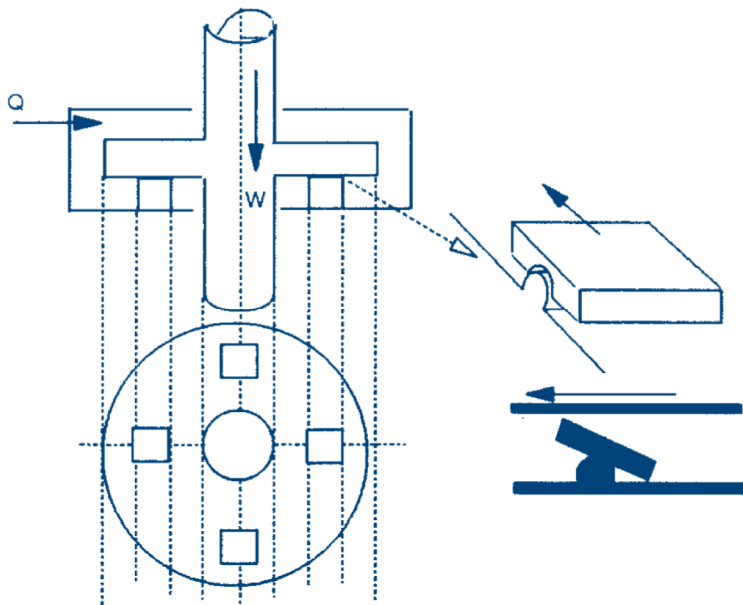
$$\begin{aligned} dp/d\theta &= \frac{6U r (e (a + \cos\theta) - h_1)}{(e (a + \cos\theta))^3}, \\ dp/d\theta &= 6U r / e^2 (1/(a+\cos\theta)^2 - h_1/e (1/(a+\cos\theta)^3)), \end{aligned}$$

Como $a^2 = c^2 / e^2$, $e = c / a$, luego será :

$$(dp/d\theta) d\theta = 6U r a^2 / c^2 [\frac{d\theta}{(a+\cos\theta)^2} - h_1/e \frac{d\theta}{(a+\cos\theta)^3}],$$

$$p - p_0 = 6U r a^2 / c^2 [\frac{d\theta}{(a+\cos\theta)^2} - h_1/e \frac{d\theta}{(a+\cos\theta)^3}], \quad (1-49)$$

Fig. 20- Cojinete de empuje



La presión p_0 corresponde a la presión atmosférica si se trata de un cojinete abierto, en caso contrario será la presión de la bomba de alimentación de lubricante. En todo caso es la presión en $\theta = 0$ o $\theta = 2\pi$, que tienen valores idénticos.

Llamando:

$$F1(\theta) = \frac{d}{(a + \cos \theta)^2},$$

$$F2(\theta) = \frac{d}{(a + \cos \theta)^3},$$

$$\frac{h_1}{e} = \frac{F1(2\theta)}{F2(2\theta)} = \frac{2a(a^2 - 1)}{2a^2 + 1}, \quad (1-50)$$

Reemplazando la (1-50) en la (1-49), obtenemos la (1-51) que nos permite integrar la ecuación de Reynolds para todas las excentricidades, obteniendo la distribución de presión en función del ángulo de giro en la dirección del movimiento.

$$p - p_0 = 6U \frac{ra^2}{c^2} \left[\frac{d}{(a + \cos \theta)^2} \frac{2a(a^2 - 1)}{2a + 1} \frac{d}{(a + \cos \theta)^3} \right], \quad (1-51)$$

La carga total se puede calcular igualándola a la integral de las componentes verticales de las presiones del fluido en el muñón, que lo soportan flotante. Si L es la longitud del cojinete y r el radio del muñón:

$$W = \int_0^{2\pi} p \sin \theta \, Lr \, d\theta \quad (1-52)$$

La integración de la (1-52), reemplazando el valor de p de la (1-51), permite llegar a la denominada *Ecuación de Sommerfeld* (1-53), una de las ecuaciones principales para el estudio de la lubricación hidrodinámica.

$$\frac{N}{P} \left(\frac{D^2}{C} \right) = \frac{(2a^2 + 1) \sqrt{a^2 - 1}}{12 \sqrt{2} a^2} \quad (1-53)$$

La expresión $\eta N/P$, donde P es la carga por unidad de superficie proyectada, es conocida como *Número de Sommerfeld*, adimensional, siendo de utilidad, conjuntamente con la ecuación (1-53), en aplicaciones relativas a cojinetes cilíndricos planos. Cuando se trata de engranajes o cojinetes a rodamientos, la incidencia de la deformación elástica de las superficies metálicas y el aumento de la viscosidad con la presión, complican los cálculos.

La *Variable de Sommerfeld*, S , muy utilizada en las gráficas de lubricación, hace intervenir la relación diámetro a luz del cojinete, según:

$$S = \frac{N}{P} \left(\frac{D^2}{C} \right) \quad (1-54)$$

Desde el punto de vista del lubricante, las relaciones anteriores vinculan el ancho de la película de aceite con la viscosidad, la cual permite al cojinete y muñón soportar la carga sobre

el último. Si la velocidad es muy baja o la carga muy alta, la figura geométrica sobre la que se basan los cálculos no se formará, no habrá película de lubricante y ocurrirá contacto metal - metal con el deterioro del elemento diseñado para el movimiento. En la Fig. 20 se ha esquematizado un cojinete de empuje, a los efectos de mostrar la misma geometría en la ubicación de la capa de lubricante que en los casos de cojinetes cilíndricos.

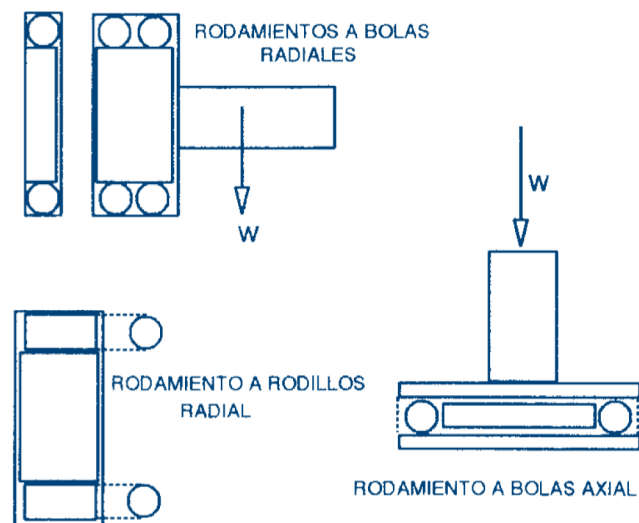
Una propiedad importante de los lubricantes vinculada a la formación de la película, es la *aceitosidad*, la cual tiene gran importancia en condiciones de bajas velocidades y altas cargas y, en condiciones de movimientos intermitentes. La aceitosidad define la adherencia del lubricante a la superficie que lubrica, que provoca que materiales de igual viscosidad puedan dar, durante el uso, diferentes coeficientes de fricción para iguales superficies y condiciones. Normalmente se la presenta como el resultado de un grupo de propiedades y no como una propiedad en sí misma. Modernamente se la vincula a la adsorción (física) o absorción (quimisorción, o fuerzas intermedias entre adsorción y reacción química), fenómenos de superficie vinculados a las propiedades de las dos fases que interactúan.

En los casos de altas cargas y bajas velocidades, cuando el lubricante es incapaz de soportar las condiciones de trabajo, se produce una condición distinta a la lubricación hidrodinámica, la capa de lubricante será inestable y en determinados casos se llegará a límites donde el contacto será "casi" metal - metal. Las severas solicitudes del elemento diseñado para un rozamiento, harán desplazar al lubricante del espacio reservado para su función, quedando solamente una fina capa adherida, si sus condiciones de lubricidad lo permiten, con la cual deberá evitar un roce real metal - metal, que deterioraría el mecanismo rápidamente.

A la lubricación en condiciones de severidades intermedias, con contactos ocasionales entre las superficies, se la denomina de *película delgada*, mientras que a altas severidades, cuando prácticamente no hay película entre las superficies, recibe el nombre de *lubricación límite*.

En la Tabla 4 se dan las características aproximadas de los regímenes de lubricación mencionados, de las cuales es preferible por supuesto trabajar en el régimen hidrodinámico para prolongar la vida del mecanismo.

Fig. 21- Distintos rodamientos



En resumen podemos decir que en la lubricación hidrodinámica, película delgada y límite, los metales del cojinete y el aceite producen su propio sistema de protección contra la fricción, dependiendo de la velocidad la presión de soporte de carga generada. Los cojinetes que actúan por estos principios, se denominan *auto-actuales*. Si el cojinete es presurizado externamente, de forma de lograr un soporte para la carga por un fluido inyectado al mecanismo desde una fuente a presión, se dice que el cojinete es *externamente presurizado o Hidrostático*.

TABLA 4 TIPOS DE LUBRICACION

LUBRICACION	CONTACTO ENTRE SUPERFICIES	RANGO DE ANCHO DE LA PELICULA	COEFICIENT . DE FRICCION(f)	DES-GAS-TE	COMEN-TARIOS
HIDRODINAMIC.	Solo en paradas o puesta en marcha	10^{-3} a 10^{-4}	0,01-0,005	Muy bajo	Baja carga. Alta velocidad $f = F(\mu NP)$
PELICULA DELGADA	Ocasionales. Depende de la rugosidad de las superficies.	10^{-4} a $0,5 \cdot 10^{-4}$	0,005 - 0,05	Medio	Alta temperatura de operación.
LIMITE	Permanente	$0,5 \cdot 10^{-4}$ a Capa molecular	0,05 - 0,15	Alto	Alta Baja velocidad Calor y fricción independiente de la viscosidad

Los cojinetes hidrostáticos presentan menos problemas que los comunes en las puestas en marcha y paradas de las máquinas, como también cuando las condiciones de trabajo se apartan de las ideales para la lubricación hidrodinámica. Una combinación de ambos cojinetes, denominados *Híbridos*, son diseñados para lograr lo mejor de cada sistema y bajar el costo del cojinete.

1.5. LUBRICACION ELASTOHIDRODINAMICA, RODAMIENTOS

Los rodamientos pueden dividirse en dos grandes grupos, *radiales* y *axiales*, los primeros estas diseñados para soportar cargas formando ángulo recto con el eje, en los segundos las fuerzas actúan en forma paralela al eje, siendo también conocidos como de empuje. Para ambos sistemas se usan generalmente rodamientos a bolas o a rodillos, donde estos últimos pueden ser cilíndricos o cónicos. Además en ambos casos se pueden dar una o más hileras y otras variantes tratando de adaptar el rodamiento al mecanismo y condiciones de trabajo del mismo. En términos generales se puede decir que los rodamientos a bolillas son recomendados para cargas pequeñas o moderadas, mientras que los a rodillos para grandes cargas.

La *duración nominal* de un rodamiento es dada por el fabricante y normalmente representa los millones de revoluciones, en una condición dada de trabajo, que es alcanzada por el 90% de una muestra de cojinetes. Los manuales informan que la duración media de un rodamiento es aproximadamente cinco veces la nominal, fundamentalmente porque en la práctica no trabajan constantemente al límite de sus posibilidades. Cuando se habla de *duración de especificación*, se refiere a una duración hipotética si se cumplen los límites de carga y velocidad del elemento.

La formación de la película de lubricante y por lo tanto la duración del mecanismo será función de:

Velocidad de rotación
 Viscosidad del aceite
 Carga sobre el cojinete
 Recarga de lubricante
 Grado de acabado superficial
 Diámetros utilizados
 Respeto por la tolerancia

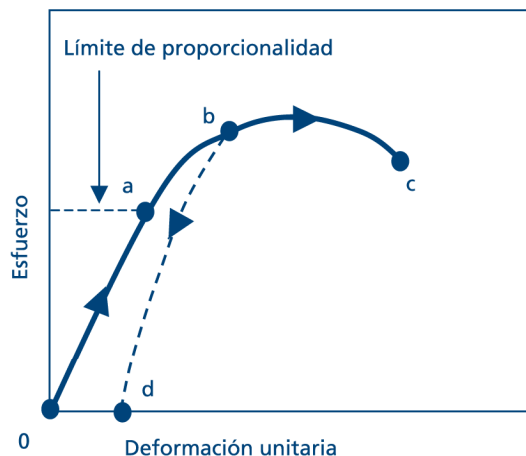


Como este estudio trata de los lubricantes para rodamientos, se tomarán como representativos los mostrados en la Fig. 21, remitiendo a los interesados en mayor información sobre los rodamientos específicamente, a la bibliografía (8.52, 8.54).

En el desarrollo que hicimos sobre la teoría de la lubricación, nos hemos referido a movimientos de deslizamiento, como el que ocurre en correderas o cojinetes planos y bujes. El caso de los rodamientos presenta particularidades que los diferencian de los *deslizamientos puros*. Como el contacto idealmente ocurre en un punto y la bolilla rota sobre la pista, la fricción o resistencia al movimiento sería de *rodamiento puro*. No obstante la condición ideal no ocurre en la práctica, la elasticidad de los metales produce una deformación en la zona de contacto, transformando el punto ideal en una superficie, sobre la cual se deslizará la pieza móvil. Se estima que el desplazamiento deslizante no sobrepasa el 5% del total de la velocidad, pero se supone que opone la mayor parte de la resistencia al movimiento.

La resistencia al rodamiento, por aumento del deslizamiento, esta vinculado al estado de las superficies, pista y bolas, a las deformaciones inelásticas, a las impurezas que contaminen el lubricante, etc. Durante el rodaje la superficie de contacto se mueve acompañando el movimiento, cuando el rotante deja la superficie la misma se recupera cumpliendo la ley de Hooke (Fig. 5). Si se sobrepasa el límite máximo donde la deformación es proporcional al esfuerzo, se ingresa en la zona de la curva donde el flujo es plástico, se produce deslizamiento del metal en su interior y el retorno a la condición inicial no se produce, siguiendo un camino como el *b-d* de la Fig. 22.

Fig. 22- Histéresis elástica



El fenómeno que se indica en la Fig. 22 con la superficie $0-a-b-d$, se denomina en la física clásica, *histéresis elástica*, donde $0-d$ representa una deformación permanente.

En lo referente a los coeficientes de fricción, podemos decir que varían con la carga a que se somete al rodamiento, en una función como la indicada en la ecuación (1-55).

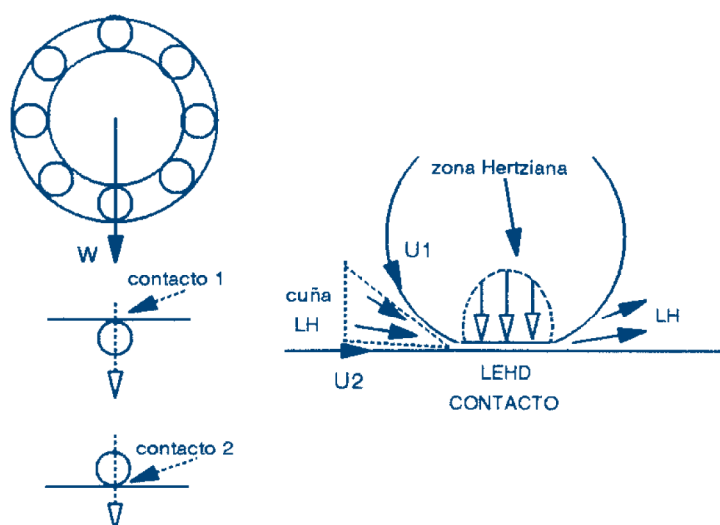
$$f = F (w^x) \quad (1-55)$$

El coeficiente x para sistemas trabajando en la zona elástica de los metales, toma valores en las proximidades de uno, mientras que las zonas plásticas, puede llegar a sobrepasar dos. La fricción es inversamente proporcional al diámetro del elemento, al repartirse igual carga en mayor superficie.

Además de los cojinetes a rodamientos, otros mecanismos soportan cargas en zonas de contacto pequeñas, como ser engranajes o árboles de levas, para los cuales valen las mismas consideraciones desarrolladas aquí, inclusive se puede considerar que iguales teorías valen para los contactos de la Fig. 29.

La teoría de la *lubricación hidrodinámica* (LH), vista en el Capítulo 1.4, no reproduce los fenómenos que abarcan superficies que no se adaptan entre sí, soportando la carga en, prácticamente, puntos de contacto. El hecho que se produzca la deformación elástica de las superficies mencionada anteriormente, permitió llamar a este tipo de lubricación, *elastohidrodinámica* (LEH). La deformación elástica se ha representado en la Fig. 23, para un cojinete a bolas, supuesto radial, donde el contacto se ha transformado de puntual en superficial, siendo esta última pequeña. Dada la diferencia de perímetro en el corte entre la pista y la bolilla, se considera que solo se "aplasta" la última.

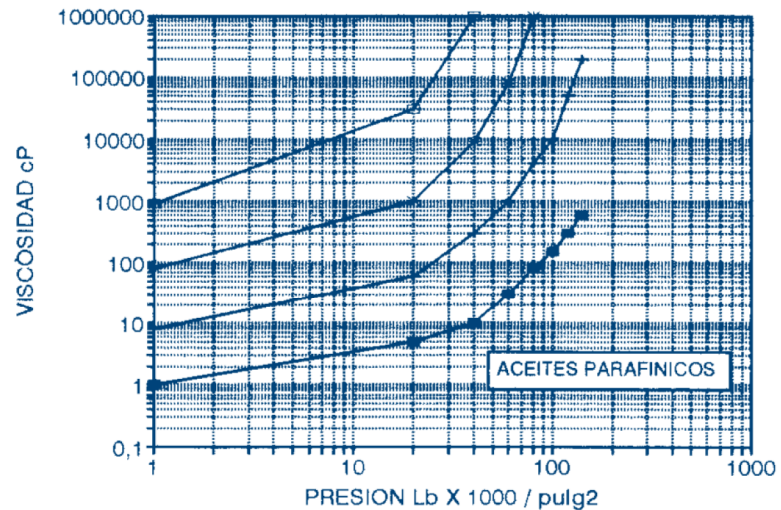
Fig. 23- Lubricación elastohidrodinámica



Hertz estudió esta condición de contacto elástico, concluyendo que en la pequeña superficie se origina una zona de muy alta presión, denominada de *Presión Hertziana*, que puede llegar a valores del orden de 15000 Kg/cm^2 . La distribución de esta presión se informa máxima en el centro de la superficie de contacto y prácticamente cero en los límites exteriores.

En la Fig. 23 se ha ampliado idealmente la zona de contacto, que denominamos Hertziana. El lubricante seguiría la trayectoria de las velocidades $U1$ y $U2$, encontrándose con la región convergente en la entrada a la zona Hertziana, esta cuña de lubricante trabajaría a LH , igual que en la sección divergente de salida. La realidad que el lubricante pasa por la zona Hertziana, a pesar que las presiones generadas por la LH son menores que las de LEH , se explica por que las máximas presiones Hertzianas se producen en el centro de la superficie, donde la viscosidad del lubricante aumenta por la presión hasta tornarlo casi sólido.

Fig. 24- Viscosidad y presión



En la Fig. 24 se muestra el aumento de la viscosidad con la presión, para aceites parafínicos, este aumento de viscosidad impide que la alta presión del centro de la zona Hertziana expulse todo el aceite, dejando una capa límite de lubricante. Al disminuir la presión la viscosidad retoma sus valores normales y el lubricante su condición de fluido.

El espesor de la película de lubricante en la zona Hertziana depende de la competencia entre la presiones generadas por la LH, que intentan separar las superficies y las generadas por la LEH, mayores y contrarias. Todo cambio que aumente la presión hidrodinámica aumentará el espesor de la película, como la velocidad o la viscosidad del fluido. El espesor de película h_n , en condiciones normales, se puede calcular por la ecuación de *Dowson*(7.52):

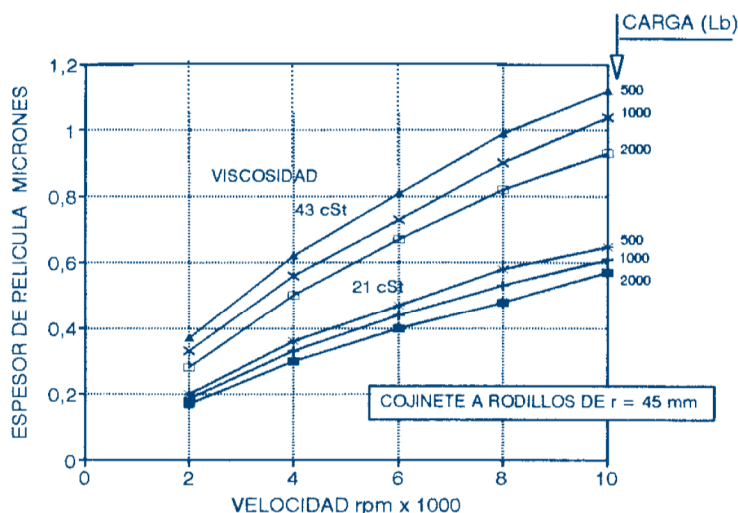
$$h_n = \frac{2,65 (\eta)^{0,7} \cdot 0,54 \cdot R^{0,43}}{\gamma^{0,03} \cdot W^{0,13}}, \quad (1-56)$$

Donde: h_n = espesor de película
 η = viscosidad lubricante
 γ = coeficiente presión-viscosidad
 $U = 1/2 (U_1 + U_2)$
 R = radio
 W = carga
 Y = modulo de Young

En la ecuación (1-56), se observa que el espesor de película es sensible a la velocidad (U), a la viscosidad del fluido (η), a la relación *viscosidad - presión* (γ) y al radio de curvatura (R). Los espesores de película son del orden de 0,05 a 0,25 micrones, calculados por la ecuación de Dawson, aclarándose que existen otras teorías al respecto. En la Fig. 25 se muestran las variaciones del espesor de película con la velocidad, la viscosidad del aceite (a la temperatura de trabajo) y la carga.

Para cojinetes que trabajan en los límites donde la película tiene un espesor adecuado, considerando como tales películas del orden de 0,1 micrones para 2000 r.p.m. y diámetros interiores del orden de 50 mm y 0,3-0,4 en las mismas revoluciones pero con diámetros de 200 mm, la vida del rodamiento depende de la histeresis de los metales, que podrán colapsarse por fatiga. Nótese que los espesores de película puede situarse dentro del orden de las imperfecciones de los metales, por lo que el estado de pulimento de las superficies y los contaminantes juegan un papel muy importante en la vida de los rodamientos, que en definitiva hacen a la vida de la máquina principal.

Fig. 25- Espesor de película en función de la carga, velocidad y viscosidad



2. TIPOS Y SELECCION DE LUBRICANTES

De acuerdo a lo anteriormente expresado, llamamos lubricación a la acción de reducir la fricción entre dos superficies en movimiento relativo. Si la causa de la disminución de la fricción es introducir una sustancia entre las superficies mencionadas, la sustancia se denomina "lubricante". Si bien es destacable un notable progreso en los sistemas de lubricación y en los lubricantes, la mayor parte de los que usa la tecnología corriente están basados en los aceites líquidos y en las grasas (semisólidos) del petróleo, ofrecidos por un competitivo mercado de marcas tradicionales.

En el sistema de cojinete a fricción, formado por una pista soporte y un muñón rotante, "journal bearing", la separación de las superficies se logra con una capa de lubricante, semisólido, líquido o gas, que ocupa un pequeño volumen entre las superficies. El espacio entre superficies o *luz* del cojinete, se diseña para dar cabida al lubricante y para permitir un buen ensamble, soportando cambios de volumen por temperatura y dando tolerancias para malos ensambles o desaliños de la máquina.

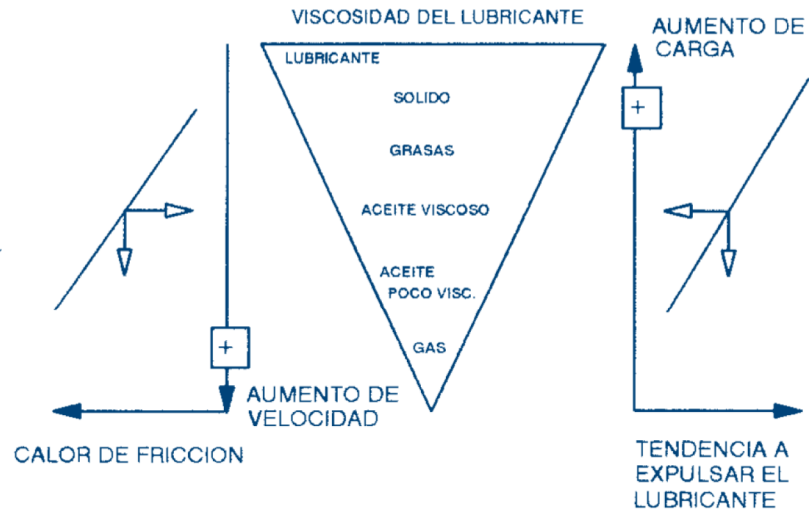
En condiciones especiales, ya sea por el mecanismo o por el medio ambiente en el que debe actuar, será necesario desarrollar lubricantes especiales. En condiciones de exigencia extrema, generalmente es prioritario determinar el tipo de lubricante y luego el sistema mecánico de aplicación.

En la actualidad se nota un rápido avance de los lubricantes sintéticos. En lo que respecta a los lubricantes gaseosos, si bien tienen similitud con los líquidos en sus aplicaciones, presentan problemas por su baja densidad a la hora de diseñar los cojinetes.

2.1. SELECCION DE LUBRICANTES

Los principales factores a considerar en la selección de los lubricantes son la carga a aplicar en el mecanismo y la velocidad del mismo. Si bien la forma y condiciones que rodea la aplicación, con sus posibles variaciones, hacen dificultoso dar una regla de forma general, la Fig. 26 permite una primera aproximación al tema. Con altas velocidades se producirá mucho calor y un lubricante de baja viscosidad lo disipará mejor, dando así mismo un coeficiente de fricción menor, disminuyendo la temperatura del mecanismo. Si la carga fuera alta, un lubricante poco viscoso tendría tendencia a ser expulsado del mecanismo, dejando las superficies en contacto.

Fig. 26- Elección de lubricantes según la carga y la velocidad



Sin embargo simples ejemplos nos dicen de la relatividad de la anterior afirmación, en un mecanismo de relojería, de baja velocidad, se usa un lubricante poco viscoso por la baja fricción que produce. Si consideramos engranajes abiertos, cadenas o alambres a la intemperie, la principal característica que le pediremos al lubricante será su adherencia a las superficies, aunque se trate de bajas cargas, el lubricante tendrá que ser lo suficientemente "pegajoso" y consistente como para permanecer en su lugar a pesar de las inclemencias del tiempo. Los cojinetes que no están sellados necesitan grasas, independientemente de la velocidad y de la carga. Es de destacar que, principalmente en problemas de alta tecnología, se han construido complejos mecanismos que no han podido luego ser lubricados, invalidando su diseño, con la pérdida económica que eso significa.

Con las limitaciones que se han mencionado, en la Tabla 5 se muestra una relación entre carga, velocidad y tipo de mecanismo, con las diferentes clases de lubricantes. Los lubricantes sólidos y secos pueden ser usados, en regímenes de baja velocidad, a más altas presiones que las indicadas en la Tabla 5. Cuando el lubricante de los cojinetes es presurizado externamente se amplía el rango de velocidades y cargas a aplicar sobre ellos.

TABLA 5 LIMITES DE CARGA Y VELOCIDAD EN LUBRICACION

CARGA Kg / cm ²	VELOCIDAD mm / seg	MECANISMO	LUBRICANTE
Hasta 200	Hasta 130	Cojinete de fricción	Sólidos-secos
Hasta 50	Hasta 1000	Cojinete de fricción	Grasas
Hasta 40	Hasta 10000	Rodamientos	Grasas
Hasta 200	Hasta 100000	Rodamientos	Aceites

Los mecanismos a lubricar se pueden agrupar según algún criterio, como por ejemplo:

CLASE A: Engranajes abiertos, cadenas, alambres, ejes transmisores pesados, mecanismos a la intemperie, bisagras.

CLASE B: Motores varios, compresores, turbinas, maquinaria industrial, movimientos de cierta importancia.

CLASE C: Relojes, instrumentos, mecanismos tipo relojería, miniaturas, cerraduras, elementos de precisión.

CLASE D: Sistemas nuevos, etapas de investigación, mecánica espacial.

La relativa utilidad de la clasificación la pondremos a prueba intentando ubicar *bisagra*, según los siguientes usos:

Bisagra del portón de la fábrica	Clase A
Bisagra de la válvula de toma de aire de una turbina.....	Clase B
Bisagra del movimiento del muñequito del tiempo en un pequeño reloj de pared.....	Clase C
Bisagra para que rote una pieza exterior de un satélite de comunicaciones.....	Clase D

La ubicación física del mecanismo también ejerce una marcada influencia sobre su diseño y el lubricante a utilizar. Se deberá conocer si es accesible a la relubricación, si esta expuesto al medio ambiente, a agua, a atmósfera contaminante, a medios corrosivos, a temperaturas extremas, etc. Debemos considerar que generalmente los cojinetes son parte integrante de un gran mecanismo, al que pueden inutilizar a pesar de representar una mínima parte de este. La vida útil y los tiempos de mantenimiento de las maquinarias suelen estar vinculados al correcto funcionamiento del lubricante y a los programas de control de la lubricación.

En los mecanismos conocidos la lubricación se hace siguiendo las instrucciones del manual del fabricante, en su defecto, la geometría y las condiciones de uso facilitarán encontrar la solución adecuada al problema. Cuando se trata de mecanismos en diseño, el sistema para lubricar y el lubricante necesario puede preceder uno al otro en importancia, según las dificultades y complicaciones del diseño principal.

La utilización de grasa, en especial en rodamientos bien especificados en lo que respecta a temperaturas y velocidades, generalmente es preferible a aceites, dada la mayor facilidad de los sistemas de lubricación y la adherencia que presentan. Además preservan mejor que los aceites al mecanismo de la contaminación con partículas del ambiente y la humedad. Cuando las condiciones de funcionamiento llevan a elevar la temperatura del cojinete y es necesario quitar calor del sistema, puede resultar más conveniente lubricar con aceite. Se informa que el noventa por ciento de los cojinetes se lubrican con grasas.

Las fallas en rodamientos se deben a diversos factores, de los cuales los principales son:

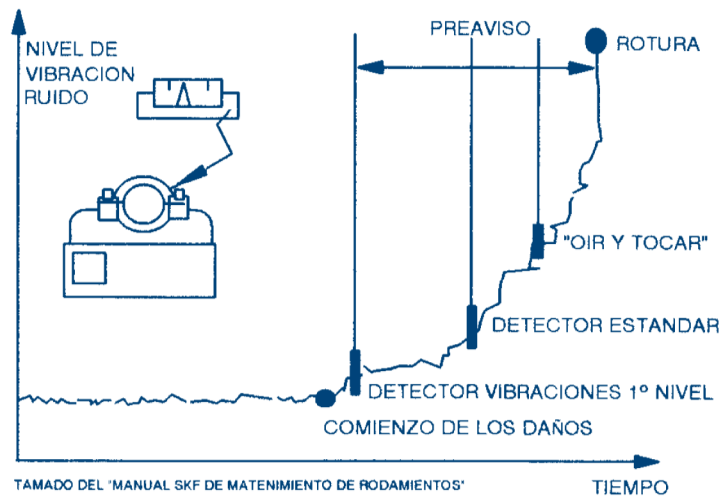
FATIGA
LUBRICACION DEFICIENTE
CONTAMINACION DEL ACEITE
FALLAS DE MONTAJE
USO INCORRECTO

Cuando se produce una falla en un sistema lubricado, conviene revisar si las cargas y velocidades utilizadas responden a las previstas, si el ajuste de las piezas respeta las tolerancias recomendadas y si no han entrado contaminantes. Las estadísticas muestran que con buenos planes de control de la lubricación, las fallas son mínimas, afirmándose que la mayoría de los rodamientos sobreviven a las maquinarias. Del total de fallos, una tercera parte resultan por *fatiga*, relacionada con las horas de uso y la intensidad del servicio. La fatiga produce grietas en las superficies que soportan las cargas, que se van *escamando*, arrastrando la rotación partículas metálicas hasta inutilizar el mecanismo. El comienzo del proceso de deterioro se detecta por los ruidos y vibraciones originados en el rodamiento afectado, debiendo ser cambiado antes que se produzcan otros efectos por falla brusca, como deformaciones de ejes.

El resto de las fallas se deben a defectos de lubricación, sobre cargas o mal montaje del mecanismo. Con buena práctica y experiencia, se puede determinar por estudio del cojinete, en especial si se los cambia cuando comienza el deterioro, si el fallo es por fatiga u otra causa. La fatiga comienza por debajo de la superficie que soporta la carga y las grietas se "corren"

hacia la superficie, pudiendo observarse en ensayos destructivos la presencia de grietas microscópicas que no han aflorado. Las otras causas presentan efectos visibles en la superficie.

Fig. 27- Control de vibraciones



El estado de los rodamientos y otras partes móviles de las máquinas se debe comprobar programadamente, un plan de lubricación y verificación de vibraciones *sistemático*, con modernos aparatos electrónicos, puede evitar fallas imprevistas y sus consecuencias. Además de estos planes, los operadores, responsables directos de las máquinas, deben *mirar, oír y tocar* los mecanismos lubricados en busca de anomalías. Un rodamiento en buen estado de funcionamiento y bien lubricado, emite un suave zumbido particular, al cual se deberán acostumbrar los operadores. Otro síntoma detectable de problemas resultan los derrames de aceite o grasa, tanto como temperaturas anormales de las partes. En la Fig. 27 se muestra, cualitativamente, el control de un rodamiento y los tiempos relativos disponibles para el recambio antes de la rotura, para cada tipo de control. Los equipos de control miden una gama de frecuencias muy altas, alejándose de las vibraciones normales de los mecanismos en marcha y en el mercado se ofrecen de distinta calidad y costo.

2.2. LUBRICANTES LIQUIDOS

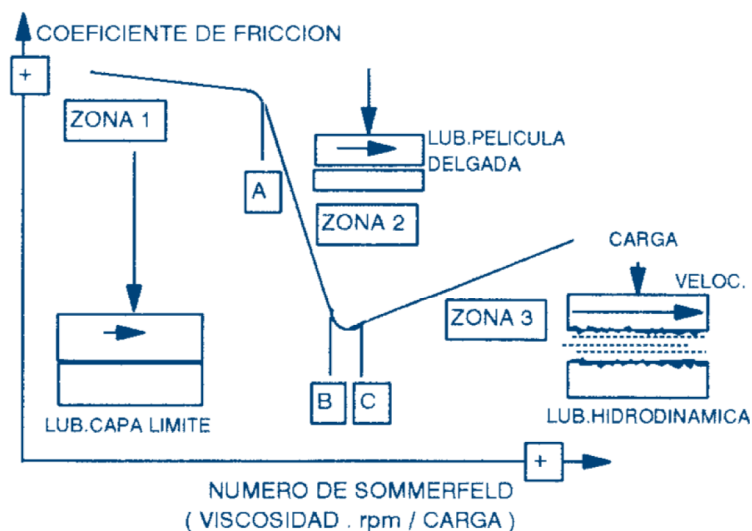
La propiedad más importante de los líquidos, desde el punto de vista de su uso como lubricantes, es la viscosidad, Stribeck, la relacionó con el coeficiente de fricción por medio de un número adimensional, el denominado número de Sommerfeld, ecuación 1-53. La curva de Stribeck, como se conoce a la Fig. 28, puede ser dividida en tres zonas para su estudio, según:

ZONA 3. - Si mantenemos la velocidad y la carga constantes, el número de Sommerfeld resulta directamente proporcional a la viscosidad del lubricante. La zona 3 muestra la parte del diagrama donde la lubricación es totalmente debida a fenómenos hidrodinámicos. Tendremos una capa gruesa de lubricante, prácticamente no se producirá desgaste y la fricción se deberá al esfuerzo de corte entre las capas de lubricante. El óptimo estará en las proximidades del punto (C), si nos alejamos de él hacia mayores viscosidades, aumentaremos la potencia necesaria para mover el mecanismo.

ZONA 2. - A medida que la viscosidad disminuye en la zona 3, a U y W constantes, observamos que disminuye la fricción, pero también disminuye el espesor de la capa de lubricante que separa las superficies metálicas. Al llegar al punto C, se produciría la situación ideal de mínima fricción, por tener la capa de lubricante el mínimo espesor que produce separación entre los

metales. Entre C y B comenzarían a producirse contactos ocasionales metal - metal, hasta que a partir de B aumenta la fricción, por aumentar los contactos entre las asperezas de las superficies metálicas a medida que la capa de lubricante disminuye su espesor. En el punto A la fricción es función principalmente de los contactos entre asperezas y, sobrepasado el mismo, la viscosidad del lubricante tendrá un efecto mínimo sobre la fricción.

Fig. 28- Curva de Stribeck



ZONA 1.- La zona 1, de altas cargas y bajas velocidades, es denominada de *lubricación en capa límite*, o lubricación límite, donde una capa molecular de aceite adsorbido o absorbido, separa precariamente las superficies. La lubricación del mecanismo depende de la "tenacidad" con que el lubricante se adhiera a las superficies, según la propiedad que denominamos "lubricidad" o "aceiticidad" del mismo. Esta zona se caracteriza por depender la lubricación de otras cualidades del lubricante más que de su viscosidad, como ser las propiedades físico - químicas de sus componentes. El comportamiento de un lubricante en esta zona del diagrama de Stribeck, es muy importante en la caracterización del mismo. Además es más estrecha la relación entre sus propiedades y las superficies metálicas, siendo así mismo más afectado el comportamiento por el deterioro progresivo que sufre el lubricante.

Los rangos de viscosidades a las temperaturas normales de operación para distintos sistemas se muestran en la Tabla 6, tratándose de engranajes, las viscosidades apropiadas son mayores que para cojinetes, estando más generalizado el uso de grasas que de aceites.

TABLA 6 RANGOS DE VISCOSIDAD PARA DISTINTOS MECANISMOS

LUBRICANTE	RANGO DE VISCOSIDAD cSt.
ACEITES DE RELOJERIA E INSTRUM.	5 - 20
ACEITES PARA MOTORES	10 - 50
COJINETES A BOLILLA	10 - 300
COJINETES PLANOS	20 - 1500
ENGRANAJES DE MEDIA VELOCIDAD	50 - 150
ENGRANAJES HIPOIDALES	50 - 600
ENGRANAJES DE ALTA TEMPERATURA	200 - 1000

TABLA 7 NUMEROS SAE PARA LUBRICANTES DEL AUTOMOTOR

NUMERO SAE J 300E	MAXIMA VISCOSIDAD A -18 °C (1)	VISCOSIDAD A MINIMO	100 °C cSt MAXIMO(2)	TEMP.°CPARA VISC.MAX DE 150000cP(3)
ACEITES PARA EL MOTOR				
0W	(-30°C) 3200	3,8		
5W	1250	3,8		
10W	2500	4,1		
15W	5000	5,6		
20W	10000	5,6		
20		5,6	MENOR 9,3	
25W	24000	9,3		
30		9,3	MENOR 12,5	
40		12,5	MENOR 16,3	
50		16,3	MENOR 21,9	
SAE J306 C ACEITES PARA ENGRANAJES				
75	3250	4,1		-40
80	21600	7		-26
85		11		-12
90		14	MENOR 25	
140		25	MENOR 43	
250		43		

(1) Método ASTM D - 2602, Cold Cranking Simulator

(2) Método ASTM D - 445, Viscosímetro Capilar

(3) Método ASTM D - 2983, Viscosímetro Brookfield

Refiriéndonos a los aceites para automóviles (motor oils), la Tabla 7 reproduce la viscosidad de los lubricantes para el motor y los engranajes, según las normas SAE, que son las usadas en nuestro país. Nótese que el *Número SAE* responde al que aparece en las latas de lubricante que cargamos en nuestro automóvil, recomendado por el fabricante.

Los aceites *multigrado* son aquellos que cumplen simultáneamente con las especificaciones de una banda de grados, por ejemplo SAE 20W/30, rango este último que los aceites minerales de buena calidad aditivados adecuadamente pueden cumplir. Cuando se trata de bandas más anchas de grados, tal como 20W/50, es necesario el uso de mayores cantidades de mejoradores de *Índice de Viscosidad* y mezclar aceites livianos con menor proporción de pesados, como se verá más adelante.

2.3. LUBRICACION EN CAPA LIMITE

En la lubricación en capa límite se producen contactos entre las superficies metálicas del elemento rotante, el caso máximo corresponde al fenómeno estudiado en fricción seca, donde no se interponía ninguna sustancia extraña entre los metales en contacto. En el caso de cojinetes o engranajes, las superficies generalmente no se presentan limpias como recién pulidas, sino que tendrán, en último caso, una capa de óxido del material que las forma.

Las superficies preparadas para uso en cojinetes, a pesar de los cuidados que se pongan, tendrán irregularidades microscópicas producto de desajustes entre la herramienta utilizada y la pieza mecanizada, como de inexactitudes de todo el sistema. El perfil de la superficie tenderá a ser *irregular*, con crestas o salientes mayores que el promedio. Se puede admitir que la superficie del metal se encuentra en una condición distinta al resto del mismo, con lo cual podemos esperar fenómenos fisicoquímicos particulares.

En términos generales podemos decir que una capa de óxido suele ser lubricante, si bien se ha informado que no es así en el caso del titanio. Si las superficies están libres de su propio óxido, aumenta la tendencia a una adherencia entre sus salientes, que muchos autores definen como una verdadera fusión en las puntas (Fig. 29). Si los metales en contacto son iguales, aumenta considerablemente la adherencia entre ellos. Los metales blandos tienen mayor tendencia a la fusión entre puntas que los duros. Algunas aleaciones con elementos no metálicos, como el carbono en los hierros fundidos, pueden reducir la tendencia a la adherencia.

Las superficies de los cojinetes lubricados, a pesar de haber perdido la película de *lubricación hidrodinámica* por una condición de trabajo extrema, quedarán contaminadas con una capa molecular de líquido, denominándose a esa condición, capa límite. La lubricación límite incluye la mayoría de los fenómenos estudiados en lubricación, menos la hidrodinámica y el deslizamiento y agarre de superficies completamente limpias. Debemos considerar que aún en cojinetes diseñados para trabajar hidrodinámicamente, se puede producir lubricación en capa límite durante las paradas o arranques de los mecanismos.

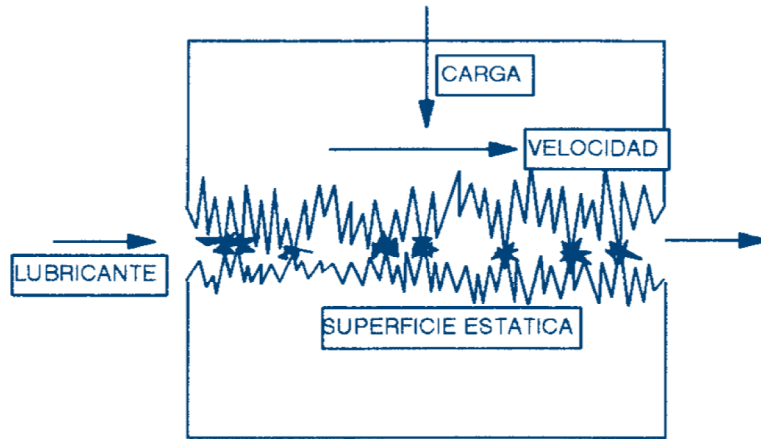
El fenómeno de adherencia de la lubricación en capa límite puede tener distintos grados de intensidad, dependiendo de la acción fisicoquímica entre el lubricante y las superficies deslizantes. Pueden ocurrir tres casos concretos:

ADSORCIÓN: La capa de una o más moléculas del lubricante se encuentra unida a las superficies por fuerzas físicas, fuerzas de atracción molecular de Van Der Waals, relativamente débiles. Normalmente se necesitan moléculas polares para facilitar la adherencia a la polaridad propia de la superficie del metal deteriorada por el maquinado. El caso de la adsorción de la molécula de un alcohol de cadena larga de la Fig. 30 es un ejemplo. La aparición de estas fuerzas en moléculas no polares se explica por la formación de dipolos oscilatorios, a consecuencia del desplazamiento de las cargas positivas de los núcleos y negativas de los electrones de los átomos, tal como ocurre con las olefinas en la Fig. 30. En el caso de moléculas polares, los dipolos se orientan hacia las superficies con mayor facilidad. En la Fig. 30 se ha representado el caso de adsorción molecular sobre una superficie metálica de un hidrocarburo no saturado y un alcohol.

El orden de las fuerzas de adsorción es de 5 a 15 Kcal/mol y el "film" formado reduce el coeficiente de fricción, interponiéndose entre los metales. Las moléculas adsorbidas se encuentran inmovilizadas, cohesionadas, fundamentalmente la primera capa, manteniéndose en esa posición si las condiciones no son muy severas. Cuando la temperatura aumenta o se produce una agitación física excesiva, decrece la cantidad de moléculas adsorbidas dada la debilidad de la unión, aumenta la fricción, aumenta la temperatura y las uniones se destruyen junto con el compuesto activo que formó el dipolo. Esta destrucción del compuesto activo deteriora al lubricante, limitando el tiempo de uso, siendo por lo tanto no recomendable someterlo a condiciones más severas que las especificadas. En uso normal la adsorción física es reversible, permitiendo largos períodos de marcha a los mecanismos.

Los aceites de petróleo naturales contienen sustancias capaces de producir capas adsorbidas de las características vistas, tales como las olefinas o los no hidrocarburos con oxígeno, azufre, nitrógeno, etc., en la molécula. Es de destacar que la refinación elimina precisamente parte de esas sustancias, por lo cual es necesario generalmente agregar pequeñas cantidades de compuestos, denominados aditivos, para devolver y aún ampliar las propiedades antifricción de los lubricantes terminados. Los aditivos formadores de película pueden ser entre otros, alcoholes o ésteres de cadenas largas.

Fig. 29- Lubricación en capa límite



ABSORCIÓN: Una segunda posibilidad en la adherencia de la película de lubricante se produce cuando las fuerzas de unión con la superficie metálica tienen carácter de quimisorción, adsorción química o *absorción*. En este caso los valores de las fuerzas de unión son del orden de 20 a 100 Kcal /mol, y soportan más altas temperaturas que la adsorción física. Para determinadas sustancias, como los ácidos grasos de alto peso molecular, las fuerzas de Van Der Waals pueden pasar progresivamente a quimisorción luego de ser adsorbidas, a medida que aumenta la temperatura. La absorción comprende fuerzas de naturaleza química, o intermedias entre las físicas y las correspondientes a reacción química, en todo caso distintas y más fuertes que las físicas puras.

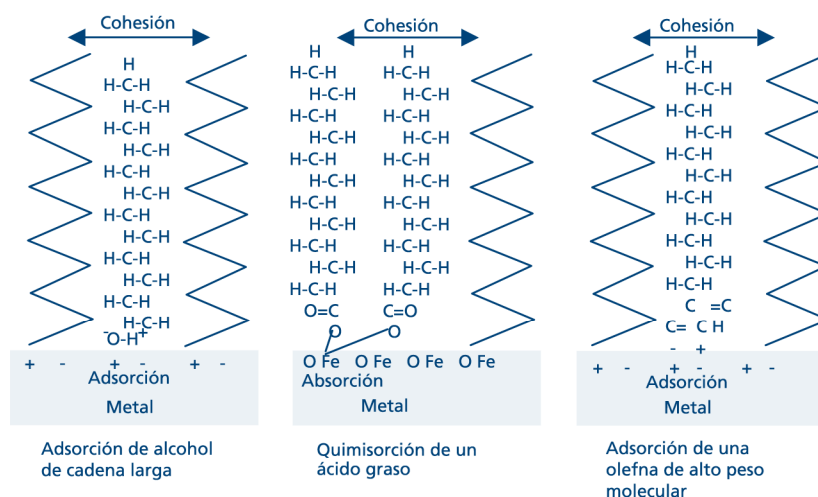
A temperaturas moderadas, en los límites de las especificaciones de mecanismos y lubricantes, la absorción es un fenómeno no totalmente reversible, en condiciones más severas, como en el caso de la adsorción, la parte activa de la molécula absorbida se puede destruir. Los aceites con propiedades antifricción por quimisorción son aditivados, por cuanto es improbable la presencia de sustancias activas en forma natural, por tanto el uso intensivo fuera de especificaciones los daña en forma permanente, disminuyendo la concentración de aditivo.

La Fig. 30, en forma esquemática, muestra un "film" de un ácido graso quimisorbido por una superficie. Como puede observarse las uniones se han supuesto con el óxido del metal, compartiendo las teorías que la naturaleza de las uniones están vinculadas a la acción catalítica de las contaminaciones de la superficie, en fenómenos complejos.

La quimisorción en la lubricación pueden resultar en una serie consecutiva de reacciones, perteneciente a la química de los complejos organometálicos, dada la presencia de metales y sus óxidos, como de fosfatos y sulfuros propios de las superficies trabajadas. El film absorbido no será necesariamente una simple acomodación de moléculas puras como la Fig. 30, sino que aparecerá como una masa monomolecular compleja ligante, denominada *complejo lubricante de capa límite*.

Estos complejos lubricantes de capa límite tienen sus desventajas, puesto que presentan ataque a las superficies, por exponerlas a mayor oxidación y a compuestos de reacciones secundarias ácidos. También el aceite base de los lubricantes se deteriora más rápido, formando las lacas y gomas propias del envejecimiento prematuro. Por lo tanto resulta aconsejable su uso en casos de real necesidad y en formulas equilibradas con aditivos inhibidores de reacciones adversas.

Fig. 30- Representación esquemática de adsorción y absorción (quimisorción). Lubricación en capa límite



Los ácidos grasos han demostrado ser efectivos sobre cobre, hierro, zinc y cadmio, por ser metales que se atacan fácilmente formando óxidos previos. En cambio el cromo y la plata son mal lubricados por ácidos grasos.

Las temperaturas y cargas soportadas por los aceites aditivados con productos que proveen características de absorción a los aceites, son moderadas, pero mayores que para los que funcionan por adsorción. Ambos casos colaboran a la propiedad denominada aceitosidad, de la cual hablamos antes.

REACCION QUIMICA: La película de aceite para lubricación límite más resistente se forma cuando se produce reacción química con la superficie metálica. En este caso habrá intercambio de electrones de valencia en un proceso irreversible y se formará un compuesto químico nuevo que separará los metales. Los compuestos reactivos generalmente contienen fósforo, cloro o azufre, que producen capas de fosfatos, sulfuros o cloruros por ataque del metal del mecanismo lubricado. Estas capas de compuestos inorgánicos formadas en el lugar por reacción química, funcionan a altas temperaturas y altas cargas, siendo más estables que las adsorbidas física o químicamente. La propiedad se consigue únicamente por aditivación, llamándose a los lubricantes obtenidos EP, *Extrema Presión*. Cuando el mecanismo lubricado con estos aceites es sometido a trabajo severo, generalmente la lubricación que se produce es del tipo elastohidrodinámica.

Los mecanismos de formación de las capas límites por los aditivos EP se presentan como muy complejos, dependientes del aditivo, de los metales de la superficie, su estado de oxidación y de las condiciones de trabajo. Se informa que un fosfato orgánico de alto peso molecular (no metálico), por ejemplo, primero será adsorbido por la superficie, luego, al aumentar la temperatura, quimisorbido como un fosfato organometálico, para luego al aumentar más la severidad y por tanto la temperatura, reaccionar con los metales formando fosfatos con el metal.

Los coeficientes de fricción para los lubricantes que reaccionan químicamente con los metales son más altos que en los casos de adsorción o quimisorción, dando por lo tanto más desgaste. El uso está limitado a aplicaciones específicas, que deben soportar cargas o temperaturas que los hacen indispensables, siendo necesario conocer el diseño del mecanismo y los metales involucrados. Se conoce que los aditivos con azufre se fijan mejor en el cobre, mientras que los de fósforo sobre el hierro. Además se informa que el azufre, en concentraciones relativamente elevadas, produce corrosión sobre los metales de los cojinetes o engranajes, y el cloro tiene tendencia a la hidrólisis formando ácido clorhídrico corrosivo en presencia de temperatura y humedad, además de favorecer cierta oxidación del aceite.

En general todos los aditivos para lubricación límite tienen ciertas desventajas, que se deben considerar a la hora de programar su uso. Por su composición química son más fácilmente oxidables que los aceites bases, formando ácidos corrosivos, y sustancias sólidas insolubles como gomas y lacas, promoviendo al formar radicales libres la descomposición del aceite. Estas acciones no queridas, son moderadas y se deben mantener bajo control con otros aditivos específicos, como inhibidores de oxidación, corrosión y desgaste.

2.4. LUBRICACION EN PELICULA DELGADA O MIXTA

La lubricación en película delgada, que se produce en la zona 2 de la curva de Stribeck (Fig. 28), se denomina también mixta por alternar, según las condiciones, lubricación hidrodinámica y límite. Mientras la fina capa de lubricante soporta la carga y velocidad, la viscosidad del aceite será el factor determinante de la lubricación, cuando las asperezas de las superficies rompan la película, se producirá contacto metal - metal, y la vida del mecanismo dependerá de las propiedades de lubricación límite del sistema.

Las altas velocidades, suponemos mayores que las especificadas para el rodamiento o engranaje, elevan la temperatura del mecanismo, produce la disminución de la viscosidad del aceite y la destrucción de la película. La condición de lubricación hidrodinámica depende de mantener velocidades no tan bajas que aumenten la excentricidad, no tan altas que afecten la viscosidad del lubricante y cargas no tan altas que expulsan el aceite de los espacios inter superficies. Cada una de estas condiciones o combinaciones de ellas, llevarán al mecanismo a lubricación mixta o en condiciones extremas, a lubricación límite pura.

2.5. CARACTERISTICAS FISICO QUIMICAS DE LOS LUBRICANTES

La Tabla 8 muestra una serie de análisis típicos y especificaciones de aceites para el automotor del mercado nacional, agregando las normas que los fabricantes certifican para sus productos. Los ensayos vinculados al cumplimiento de normas internacionales de calidad, como por ejemplo API GL-5, responden a ensayos de banco en laboratorios reconocidos por los organismos que otorgan el certificado y se verán más adelante. Los ensayos simples de laboratorio como los mencionados en los análisis típicos de la tabla, generalmente se usan como control de fabricación, constancia de propiedades específicas o concentración de aditivos, como así el control del deterioro por el uso del aceite. A continuación se dará un resumen de los principales métodos de ensayo y su significado.

TABLA 8 ACEITES TIPICOS DEL MERCADO NACIONAL

ENSAYOS Y CONDICIONES	UNIDAD	MET. ASTM	ACEITE CARTER	ACEITE CARTER	ACEITE CAJA Y DEFEREN	ACEITE ATF
BASE	-	-	PETROL.	PETROL.	PETROL.	PETROL
MOTOR / MECANISMO	-	-	NAFTA	DIESEL.	HIPOIDAL	TRANSM. AUTOMA.
GRADO SAE	-	-	30	40	-	80W-90
VISC.40 °C	CSt	D-445	107	166	36	-
VISC 100 °C	CSt	D-445	11,3	15	8	15
IND.VISC.		D-2270	90	90	161	90
VISCOS. A TEMP °C	CP	D-2602	-	-	-	
VISC. APARENTE A X °C	CP	D-2983	-	-	X = -40 °C 38000	X = -26 °C 130000

PUNTO INFLAM	°C	D-92	222	230	184	-
PUNTO ESCUR.	°C	D-97	-9	-15	-40	-30
HERRUMBRE	-	D-665	-	-	Pasa	-
EP TIMKEM	Lb	D-2782	-	-	-	50
CUMPLE NORMAS INTERNACIONALES			API SB	API SF MIL - L - 46152C	G.M. DAIMLER- BENS pag 236.6	API-GL-5 MIL-L 2105D
				FORD ESE M2C-153B	CATERPI LLAR TO-2	
				GM 6136 M	ATF TIPO A SUFIJO A	

2.5.1 CARACTERISTICAS DE EMULSION, ASTM D 1401-98

También denominado **EMULSIONABILIDAD** o **DEMULSIBILIDAD**, el segundo estaría más de acuerdo con la propiedad buscada. ASTM lo denomina "Separación de agua de aceites de petróleo y fluidos sintéticos", resultando una medida de la facilidad de separar el agua de los materiales mencionados.

El ensayo se realiza en una probeta de 100 cm³, colocando 40 cm³ de agua y aceite respectivamente. Se lleva a temperatura constante de 54,4 °C y se agita a 1500 r.p.m. por 5 minutos. Se deja reposar por 5 minutos y se van midiendo las capas de aceite, agua y emulsión en las interfases, durante 30 minutos, cada 5 minutos de agitación y 5 de reposo. En casos especiales, según algún requerimiento, el ensayo se puede llevar en las mismas condiciones a 60 minutos.

Tomando como ejemplo la especificación de la Tabla 35, 40-40-0(15), la misma significaría que haciendo la medición a los 15 minutos (15) se deben separar los 40 cm³ de aceite y los 40 cm³ de agua, siendo la parte emulsionada 0, (aceite - agua - emulsión - tiempo).

Generalmente se interpreta como un máximo admitido que la emulsión no supere 3 cm³ en 30 minutos de ensayo, un ejemplo de un resultado en este orden podría ser, 39-38-3 (30). En un aceite muy bueno el ensayo daría 40-40-0 (5), se debe considerar que al final del ensayo el volumen puede aumentar por incorporación de aire al sistema y por el aumento de la temperatura.

2.5.2. TENDENCIA A LA FORMACION DE ESPUMA, ASTM D 892-97

El método de ensayo cubre la determinación de las características de formación de espuma de aceites lubricantes a 25°C y a 93,5°C. El significado del ensayo es dar una medida de la tendencia a la formación de espuma y de la estabilidad de la misma.

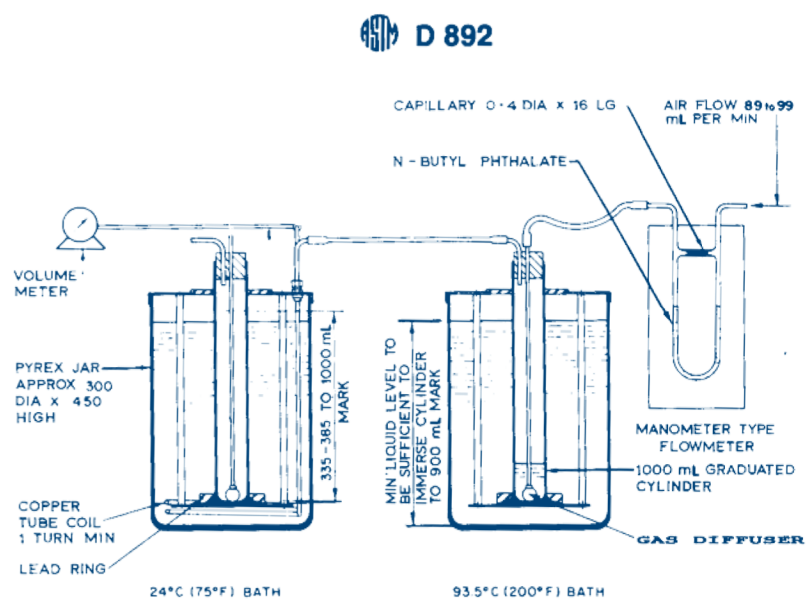
En una probeta de 1000 cm³ se introducen 200 cm³ de aceite en ensayo, colocándola en un baño a temperatura constante, por medio de un difusor calibrado se le pasa al aceite una corriente de 94 cm³/min. de aire durante 5 minutos (Fig. 31). Se realizan tres secuencias de ensayos, la primera a 24 °C, la segunda a 93,5 °C sobre una muestra nueva y la tercera, sobre la misma anterior ensayada a 93,5 °C, reensayada a 24°C, luego de colapsada la espuma.

En cada ensayo se mide el alto de espuma formada a los 5 minutos, que se informa como *tendencia a la formación de espuma*. Se deja en reposo 10 minutos y se mide nuevamente el alto de la espuma remanente, informándose como *estabilidad de la espuma*.

El resultado se informa con seis números, TENDENCIA 400-20-450, ESTABILIDAD 10-0-15, significa que un aceite tiene una tendencia a formar 400 cm³ de espuma en las condiciones del ensayo a 24 °C, que en 10 minutos dada su estabilidad, pasa a 10 cm³. Que una nueva muestra del mismo aceite, a 93,5 °C, tiene una tendencia a formar 20 cm³ de espuma, con una estabilidad de 0, o sea que en 5 minutos desaparece. Por otro lado la misma muestra de la secuencia dos, enfriada y colocada a 24 °C, forma 450 cm³ de espuma que en 5 minutos pasa a 15 cm³.

La formación de espuma, más aún si esta es estable, disminuye la viscosidad del aceite cambiando las relaciones de lubricación. Además el aumento de volumen puede provocar derrames por rebalse por juntas u orificios, con peligro de incendios.

Fig. 31- Aparato para la el ensayo de formación de espuma ASTM (7.28)

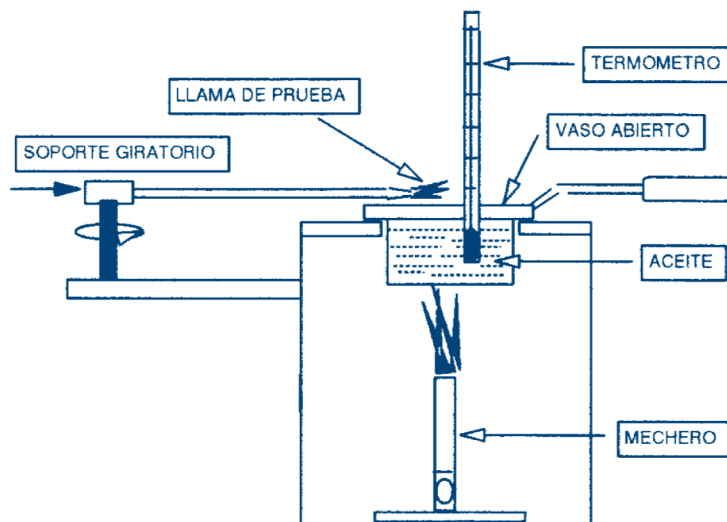


2.5.3. PUNTO DE INFLAMACION, ASTM D 92-97

Los aceites presentan un *punto de inflamación* elevado, por tal causa no son usados generalmente los métodos "Tag" y "Pensky-Martens" (Tomo II Ficha Técnica N° 3), que son de vaso cerrado, aplicándose el Cleveland, de vaso abierto. La Fig. 32 esquematiza el aparato ASTM. El punto de combustión, que se presenta unos 20 ó 30 °C por arriba del de inflamación, representa la temperatura a que hay que calentar el aceite para que mantenga la llama por cinco segundos.

El PI da una idea de posibles contaminaciones con productos livianos, como una dilución con nafta durante el uso, o una descomposición térmica por sobrecalentamiento. Durante la fabricación indicaría una mala operación de despojamiento en los "stripper". Como en el caso de todos los combustibles del petróleo que *normalmente* no inflaman con facilidad, un bajo PI aumenta el riesgo de incendio por no tomarse, por lo general, suficientes precauciones con este tipo de productos.

Fig. 32- Punto de inflamación vaso abierto.
ASTM D-92 "Cleveland"



2.5.4. NUMERO DE NEUTRALIZACION, ASTM D 664-95, ASTM D 974-97, ASTM D-2896-98, ASTM D 4739-96

Los métodos bajo la denominación de *Número de neutralización*, cubren los procedimientos para determinar los constituyentes ácidos o básicos de los aceites, por una titulación potenciométrica o colorimétrica. Se informan como:

TAN, N° de Acido Total, mg de OHK/gr de muestra, necesarios para neutralizar la acidez de la muestra.

TBN, N° de Base Total, mg de ácido expresado como HOK/gr, necesarios para neutralizar la alcalinidad del aceite.

En cada caso se debe mencionar el método utilizado

Los números TAN o TBN son utilizados para controlar los procedimientos de elaboración o para efectuar un seguimiento del lubricante durante su uso y detectar degradación o contaminación. Se deberá tener en cuenta en la última opción, que los modernos aceites contienen aditivos que pueden conferirle acidez orgánica no corrosiva, o alcalinidad alta precisamente para neutralizar acidez de deterioro y por lo tanto pueden confundir los resultados obtenidos. En los aceites muy alcalinos por fabricación, la disminución del TBN indicaría la neutralización de la alcalinidad por los ácidos formados por el uso y la pérdida de vida útil del lubricante.

Los aceites nuevos y usados contienen constituyentes acídicos, tales como; ácidos orgánicos e inorgánicos, esterés, compuestos fenólicos, complejos organometálicos, resinas, sales de metales pesados, sales ácidas, ácidos polibásicos y compuestos agregados como inhibidores y detergentes, entre otros.

Las características principales de los distintos métodos se pueden simplificar según:

ASTM D 664-95.- Es un método potenciométrico, determina las sustancias ácidas presentes en la muestra solubles en una mezcla de tolueno y alcohol isopropílico. Solución titulante; hidróxido de potasio en alcohol isopropílico.

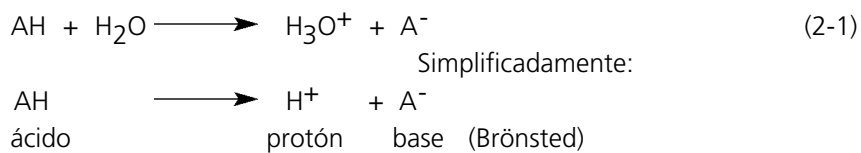
ASTM D 974-97.- Es un método colorimétrico, permite determinar tanto las sustancias acídicas como, en su caso, las bases presentes. Los constituyentes

básicos pueden ser; bases orgánicas e inorgánicas, amino compuestos, sales de ácidos débiles, sales básicas, jabones y algunos inhibidores agregados. La muestra se disuelve en tolueno y alcohol isopropílico, titulando con HOK o HCl según resulte una solución básica o ácida respectivamente.

ASTM D 2896-98.- Este método cubre la determinación de los constituyentes básicos de una muestra disuelta en clorobenceno y ácido acético, por titulación potenciométrica con una solución de ácido perclórico en ácido acético glacial. A los constituyentes básicos ya mencionados, se agregan por este procedimiento las sustancias básicas propias de los aditivos.

ASTM D 4739-96 Es un método potenciométrico, determina las sustancias básicas presentes en la muestra solubles en una mezcla de tolueno, alcohol isopropílico y cloroformo. Solución titulante; ácido clorhídrico en alcohol isopropílico.

Las reacciones químicas de neutralización son llevadas a cabo generalmente en solución acuosa. En tales condiciones los ácidos se disocian según:



Se denomina constante de disociación ideal a la expresión:

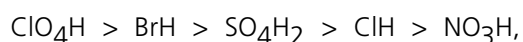
$$K = \frac{(\text{H}^+) \times (\text{OH}^-)}{(\text{AH})}$$

A mayor disociación mayor fuerza de los ácidos, mayor desplazamiento de la (2-1) hacia la derecha, mayor poder donante de protones. Luego a medida que la constante de disociación aumenta, aumenta el carácter *fuerte* de los ácidos.

Retomando la (2-1) se puede escribir:



La fuerza del *Acido 1* depende de la capacidad de aceptar protones, o sea de la fuerza básica, de la *Base 1*. La *Base 1* representa el solvente en el cual se realiza la reacción de neutralización, que en el caso de la (2-1) es el agua. Por su carácter de base relativamente fuerte, el agua como solvente nivela la fuerza de los ácidos denominados fuertes, como el HCl y el ClO₄H (perclórico), los cuales son considerados totalmente ionizados. Si el solvente no es el agua, o sea reacciones en *sistemas no acuosos*, como el ácido acético glacial, la tendencia a perder el protón varía, conformando la fuerza de los ácidos la tendencia:



Los métodos ASTM para *número de neutralización* utilizan solventes no acuosos, pero en el caso del D 2896-98 un ácido más fuerte en esas condiciones, el perclórico.

El carácter básico del ácido acético glacial como solvente se explica por la ecuación siguiente:



Las sustancias básicas presentes en las muestras de aceites analizadas, con constantes de disociación mayores de 10^{-9} , serán detectadas por los métodos ASTM D 664-95, ASTM D 974-97 y ASTM D 4739-96. Las bases débiles de la mayoría de los aditivos básicos, con constantes de disociación menores que la mencionada, deben ser valoradas con el método ASTM D-2896-98, que utiliza ácido perclórico.

2.5.5. NUMERO DE PRECIPITACION, ASTM D 91-97

El ensayo se realiza por centrifugación a 1500 r.p.m. de una muestra de aceite diluida en solvente de petróleo (corte 50 – 130°C), en proporción de 10-90 en volumen respectivamente. El volumen depositado en el fondo del tubo de la centrifuga, se informa como el NUMERO DE PRECIPITACION, representando el material insoluble en nafta suspendido en el cuerpo del aceite. A los sólidos finamente divididos distintos de los productos de petróleo, se suman los *asfáltenos*, productos de petróleo insolubles, que se verán al desarrollar asfaltos.

2.5.6. CENIZAS, ASTM D 482-95, ASTM D 874

La determinación de las cenizas en peso que el aceite deja luego de combustionar en una cápsula de porcelana y calcinar en una mufla a 775°C (D 482), es una medida de los materiales inorgánicos que posee. El ensayo es indicado para aceites libres de aditivos formadores de cenizas. En el caso de aceites usados, conociendo el valor de origen, se pueden sacar conclusiones sobre contaminaciones con metales o arena del polvo atmosférico. El agregado de aditivos, los cuales aportan una apreciable cantidad de cenizas, ha hecho perder importancia a este ensayo, no obstante los fabricantes de automóviles suelen limitar las cenizas, que se depositan en las cámaras de combustión, a los efectos de evitar el uso de exceso de aditivos.

Para aceites aditivados, antes de calcinar a 775°C, se agrega ácido sulfúrico, con lo cual las cenizas resultan sulfatadas (D 874). El ensayo se utiliza fundamentalmente para aceites nuevos, como control del aditivado, generalmente compuestos de Ba, Ca, Zn, Mg, Na, K, etc, que se fijan como los respectivos sulfatos.

2.5.7. INDICE DE VISCOSIDAD, ASTM D 2270-98 (Relacionados ASTM D 341-98)

El *Indice de Viscosidad*, IV, es un número que se calcula con dos viscosidades cinemáticas determinadas sobre un mismo aceite a dos temperaturas, 40 °C y 100 °C respectivamente. En realidad es un número comparativo, donde se relaciona la variación de la viscosidad con la temperatura del aceite desconocido, con la variación que se produce en dos aceites patrones a los que arbitrariamente se les asigna 0 y 100 de IV. Un IV de 0 indica que el aceite cambia mucho la viscosidad con la temperatura, en cambio 100 de IV, denota poca sensibilidad del aceite a dichos cambios.

La dependencia de la viscosidad con la temperatura para los aceites lubricantes de petróleo no ha sido derivada teóricamente, habiéndose realizado trabajos experimentales de los cuales resultaron ecuaciones empíricas. Una de estas ecuaciones corresponde a Walther(1930), según:

$$\log \log (\nu + c) = A + B \log T \quad (2-2)$$

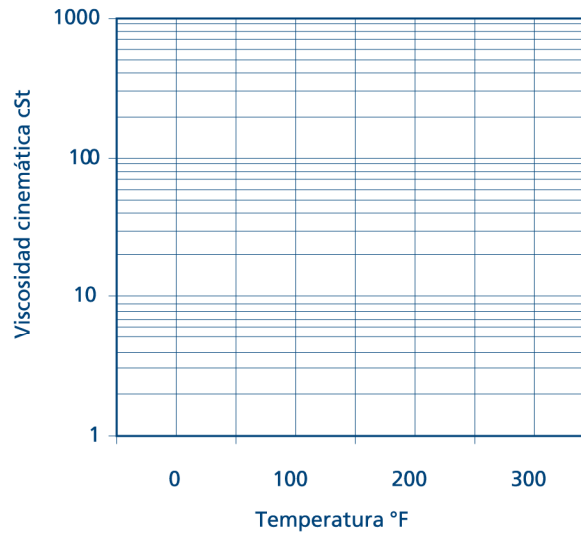
Donde: ν : viscosidad cinemática

T: temperatura

A, B, c: constantes

En el método D 341(originalmente D 341-32T), ASTM derivó la ecuación (2-2), obteniendo una carta con una relación lineal para la viscosidad en función de la temperatura, de la forma de la Fig. 33. ASTM provee cartas para altos rangos de viscosidad, hasta 20000000 cSt y bajos hasta 6,0 cSt. En las últimas ediciones (1999), la temperatura aparece en *Grados Celsius*.

Fig. 33- Carta Viscosidad cinemática – temperatura



El método propuesto originalmente por Dean y Devis(8.56), consistía en aplicar la fórmula (2-3), interpolando el aceite desconocido entre los valores de los patrones, los cuales debían tener la misma viscosidad del aceite problema a 98,89°C. El patrón 0 de IV correspondía a un aceite de un petróleo nafténico del Golfo de México, mientras que el 100 de IV a uno de Pennsylvania, parafínico. Las viscosidades originales resultaban por el método Saybolt Universal y se obtenían a 37,78 y 98,89 °C (en realidad su equivalente en °F), resultando de practica laboriosa lograr los aceites patrones que coincidieran en la viscosidad a 98,89°C con el aceite en ensayo. La Tabla 9 muestra un condensado de las viscosidades a 40 y 100 °C de aceites patrones, con la cual determinamos H y L, de la Fig. 34.

$$I.V. = 100 \frac{L-U}{L-H} \quad (2-3)$$

Donde : U = Viscosidad a 40 °C de la muestra
 L = Viscosidad a 40 °C de un aceite patrón de I.V. = 0, que a 100 °C tiene la misma viscosidad que la muestra.
 H = Viscosidad a 40 °C de un aceite patrón de I.V. = 100, que a 100 °C tiene la misma viscosidad que la muestra

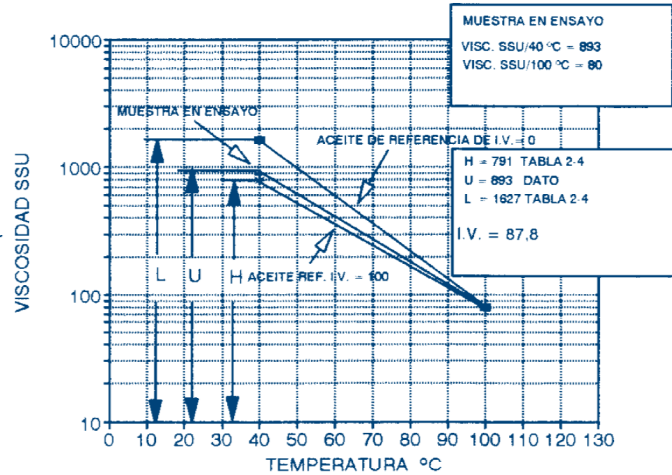
TABLA 9 VISCOSIDADES DE ACEITES PATRONES PARA EL I.V.

		VISCOSIDAD SAYBOLT UNIVERSAL a 100 °C						
I.V.	-	60	70	80	90	100	120	
VISC.. a 40 °C	0 L	781	1182	1627	2115	2646	3838	
VISC.. a 40 °C	100 H	426	604	791	873	1043	1398	

Cuando el método fue estandarizado por la ASTM, la dificultad para obtener aceites patrones fue cubierta por tablas de aceites teóricos, llamadas de *valores básicos para L y H* (Tabla 10), con lo cual solo se necesitan las viscosidades cinemáticas del aceite bajo ensayo.

El uso del Sistema Internacional(SI) de unidades hizo que ASTM reemplazara las anteriores temperaturas, surgidas de transformar 100°F y 210°F a grados centígrados, por 40°C y 100°C, informado que las viscosidades obtenidas a las temperaturas mencionadas no presentan diferencias apreciables con las anteriores.

Fig. 34- Índice de Viscosidad



Los valores de L y H se obtienen del método ASTM D 2270-98, como también del I.P.-73, actualizados y completos. Las viscosidades pasan a ser cinemáticas expresadas en Centi – Stokes (cSt). La Tabla 10 presenta una fracción de la ASTM del método D 2270.

TABLA 10 VALORES BASICOS DE L y H PARA VISCOSIDAD CINEMATICA EN EL SISTEMA 40 – 100°C(ASTM)

VISCOSIDAD CINEMATICA A 100°C cSt	L	H
5,0	40,23	28,49
5,1	41,99	29,46
5,2	43,76	30,43
5,3	45,53	31,40
5,4	47,31	32,37
.....
20,0	493,2	229,5
20,2	501,5	233,0
20,4	510,8	236,4
20,6	519,9	240,1
20,8	528,8	243,5
.....

Los valores de L y H se pueden calcular por aplicación de los formulas del ASTM:

$$L = 0,8353 Y^2 + 14,67 Y - 216 \tag{2-4}$$

$$H = 0,1684 Y^2 + 11,85 y - 97 \tag{2-5}$$

Donde : Y = Visc. Cinamát. Aceite ensayado

Las tablas dan valores hasta 70 cSt de viscosidad cinemática a 100°C, debiéndose luego utilizar los cálculos por las ecuaciones anteriores. Los *Índices de Viscosidad* se calculan según se trate de 100 y menores o, 100 y superiores:

$$\begin{aligned} 100 \text{ y menor de IV:} & \quad IV = [(L-U)/(L+H)] \times 100 && \text{(igual ecuación 2-3)} \\ 100 \text{ y mayor de IV:} & \quad IV = [((\text{antilog } N)-1)/0,00715] + 100 && (2-6) \end{aligned}$$

Donde: $N = (\log. H - \log. U)/\log. Y$

Nótese que en la (2-6) desaparece L, relacionado al patrón de IV 100, ahora sobrepasado.

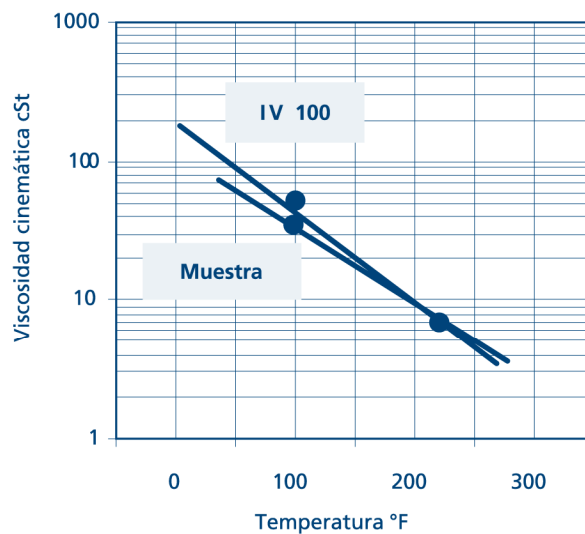
EJEMPLO 4, Calcular el IV de un aceite de:

$$\begin{aligned} \text{Viscosidad cinemática a } 40^\circ\text{C} &= 22,83 \text{ cSt} \\ \text{" " " a } 100^\circ\text{C} &= 5,05 \text{ "} \\ \text{De la Tabla 10:} & \quad H = 28,97 \text{ (interpolando)} \\ & \quad L = 41,11 \text{ (")} \end{aligned}$$

Si intentamos aplicar la carta de la Fig. 33 y la fórmulas (2-3) para IV menores o iguales a 100, tendríamos:

$$\begin{aligned} IV &= [(L-U)/(L+H)] \times 100 = [(41,11-22,83)/(41,11+28,97)] \times 100 = \\ &= 26 \end{aligned}$$

Ejemplo 4 Variación de la con la temperatura de un aceite de IV 100 y el aceite problema



Utilizando para comprobación la gráfica de la Fig. 35:

$$\begin{aligned} 100^\circ\text{C patrón } 100 \text{ IV} &= 5,05 \text{ cSt} && 43 \text{ SSU (Fig. 35)} \\ 40^\circ\text{C patrón } 100 \text{ IV} &= 150 \text{ SSU} && 30 \text{ cSt (aproximado)} \end{aligned}$$

Resulta que el valor de L no existe por cuanto la muestra se sale del rango IV (0 –100), mejorando al aceite hipotético de IV 100. El número de 26 encontrado para el IV es nulo, resultado solo del cálculo. La aplicación de la ecuación (2-6) dará el resultado correcto:

$$\begin{aligned} IV &= [((\text{antilog } ((\log. H - \log. U)/\log. Y))-1)/0,00715] + 100 = \\ &= [((\text{antilog } 0,1478)-1)/0,00715] + 100 = 156 \\ IV &= 156 \end{aligned}$$

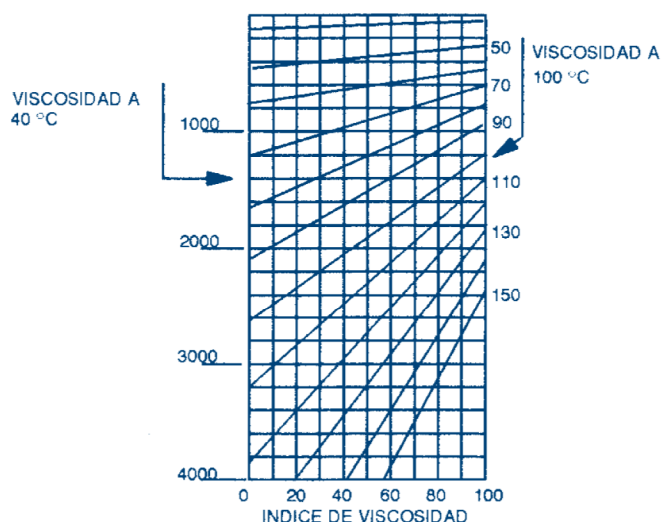
La importancia del IV está relacionada con la propiedad de un aceite lubricante de mantener su viscosidad, la que el mecanismo que lubrica necesita, a pesar de los cambios de temperatura obligados por el uso. Esta propiedad de los aceites es particularmente importante en los aceites multigrado, que requieren de IV muy altos.

En la Fig 35 se muestra una forma gráfica de determinar el IV, aclarándose que sus resultados son aproximados, siendo necesario aplicar los procedimientos del ASTM para cálculos exactos.

Las temperaturas estándar para las viscosidades fueron en un principio 100 °F y 210 °F, que convertidas a centígrados resultaron, 37,8 y 98,9 °C. En la actualidad se han unificado criterios y gradualmente se impone el uso general de 40 y 100 °C, no obstante lo cual se podrán ver distintos valores en uso. Igual ocurre con las viscosidades, los sistemas SSU y SSF, poco a poco van cayendo en desuso, pero siempre aparece algún uso residual, sobre todo cuando se trata de correlaciones antiguas que no pierden actualidad. A los efectos de acostumbrar al lector a los distintos sistemas se han utilizado como lo encontrarán en la bibliografía general.

Los índices de viscosidad, dadas las definiciones que dominan su determinación, tienen limitaciones en cuanto a sus alcances. En primer lugar puede haber IV negativos, siendo para los aceites minerales normal un límite máximo positivo de 120, valor que se puede superar con el agregado de aditivos mejoradores de IV. Los valores superiores a 120, cambian la composición química del aceite, a mayor número más aditivo agregado, distorsionando los resultados de aplicar la fórmula (2-6). Además es destacable que no resulta una propiedad aditiva, por lo cual las mezclas no dan resultados promedios.

Fig. 35- Índice de Viscosidad, cálculo aproximado con visc. SSU



Los aceites de alto IV, muy aditivados, se alejan a bajas temperaturas de la condición de líquidos newtonianos, lo cual los hace *no cumplir* la ecuación de Walther. Como se verá en su oportunidad, los aditivos mejoradores del IV son polímeros o copolímeros de alto peso molecular, que se comportan en forma especial con el descenso de la temperatura, en todo caso en forma inversa al aceite que los contiene.

2.5.8. COLOR, ASTM D 1500-98

El uso intensivo de aditivos mejoradores enmascara el color natural de los aceites de petróleo, que para los parafínicos es de una fluorescencia verde y para los nafténicos azulada. Esto ha hecho que la determinación de color perdiera actualidad para los lubricantes terminados, en cambio se usa intensivamente en la refinación y fabricación, en etapas intermedias como control de calidad.

El método ASTM D-1500 consiste en comparar el aceite con una serie de vidrios coloreados, en un colorímetro estándar, asignando valores de 0, poco color, a 8, muy coloreado.

En los aceites usados o en servicio, la determinación de color puede resultar una indicación primaria de deterioro o contaminación.

Es posible encontrar valores de color asignados al Método ASTM – UNION D 155, el cual fue discontinuado por el ASTM en 1960. Es de destacar que los números indicativos son similares, aunque menos precisos por las mejoras técnicas del D 1500.

2.5.9. PODER ANTIHERRUMBRE(“Rust Preventing Characteristics”), PARA ACEITES INHIBIDOS EN PRESENCIA DE AGUA, ASTM D 665-98

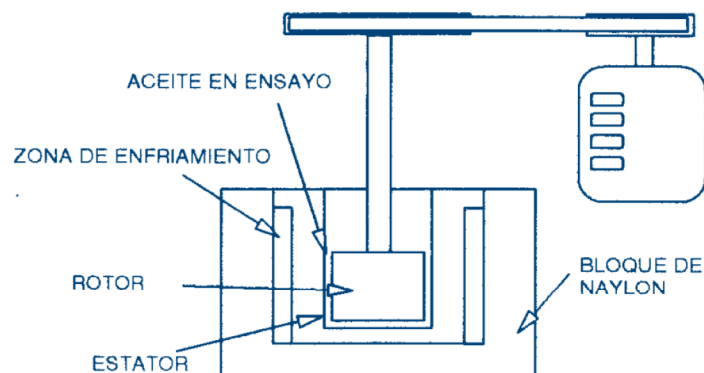
El ensayo consiste en calentar a 60 °C 300 ml de muestra de aceite, a la cual se han agregado 30 ml de un agua símil *agua de mar*, con una pieza de acero común sumergida (de fácil oxidación), por 24 horas con constante agitación. El ensayo se evalúa por las manchas de ataque que se producen en el metal. Se considera herrumbra el área coloreada, con socavones (“pits”) y rugosidades propias de la corrosión. Si al termino del ensayo no se encuentra herrumbre, se informa que el aceite *pasa* el ensayo.

2.5.10. VISCOSIDAD APARENTE DE ACEITES PARA MOTOR ENTRE –5 Y –30°C. ASTM D 5293-98, SIMULADOR DE ARRANQUE EN FRIO (CCS).

Se trata de la determinación viscosidad aparente de un aceite, en un aparato de laboratorio que simula las condiciones de arranque en frío del motor.

En la Fig 36 se ha representado esquemáticamente el equipo CCS (“Cold Cracking Simulator”), el espacio entre los cilindros, rotor y estator, donde el interior (rotor) gira impulsado por un motor eléctrico, se llena con el aceite en ensayo. Las lecturas de la velocidad del rotor, que son una función de la viscosidad del aceite, comparando con una carta confeccionada con aceites de calibración, permite obtener la viscosidad aparente en centiPoise (cP = mPa.s, Mili Pascal.seg) del aceite en ensayo.

Fig. 36- Simulador de arranque en frío, CCS



La viscosidad aparente en CCS no correlaciona con la circulación del aceite a bajas temperaturas por los sistemas de circulación, ni por las bombas de lubricante del automóvil, solo se recomienda (ASTM) para el arranque en frío.

2.5.11. VISCOSIDAD CON VISCOSIMETRO BROOKFIELD, ASTM D 2983 - 93

El viscosímetro Brookfield utiliza el principio esquematizado en la Fig. 3, Ficha Técnica Nº 2, Tomo II, determinando la resistencia al rozamiento interno de las capas de aceite en ensayo, midiendo la fuerza necesaria para obtener una velocidad constante de giro del cilindro interior de superficie conocida, o sea que determina una viscosidad absoluta.

2.6. LUBRICANTES PARA CARTER

Las *condiciones de servicio* a que está sometido un aceite de cárter, que representan las exigencias no solo del motor en sí, sino las que derivan de las zonas geográficas donde actúa y la rigurosidad del servicio que se le pide, se pueden resumir:

- 1.- DISEÑO DEL MOTOR
- 2.- ESTADO DE DESGASTE DEL MOTOR
- 3.- ESTADO Y TIPO DE FILTROS Y REFRIGERACION
- 4.- TEMPERATURAS EXTREMAS DE TRABAJO
- 5.- FRICCION POR GRANDES VELOCIDADES
- 6.- TOLERANCIAS MINIMAS ADOPTADAS PARA LOS MECANISMOS
- 7.- AMBIENTES CON GASES NOCIVOS
- 8.- CAPACIDAD LIMITADA DEL CARTER
- 9.- PARADAS, ARRANQUES, CAMBIOS BRUSCOS DE VELOCIDAD, CARGA
- 10.- CLIMA DEL LUGAR DE USO
- 11.- MANTENIMIENTO, RENOVACION DE PARTES
- 12.- USOS Y COSTUMBRES DEL USUARIO, FORMA DE CONDUCIR

Para satisfacer los requerimientos mencionados el lubricante debe cumplir las *funciones* que se mencionan a continuación:

- 1.- REDUCIR EL DESGASTE
- 2.- REFRIGERAR LAS PARTES
- 3.- EVITAR LA CORROSION
- 4.- REDUCIR LOS RESIDUOS Y ACUMULACION DE DEPOSITOS
- 5.- MANTENER EN SUSPENSION LOS CONTAMINANTES
- 6.- MANTENER LA VISCOSIDAD PESE A LOS CAMBIOS DE TEMPERATURA
- 7.- NEUTRALIZAR LOS ACIDOS FORMADOS EN LA COMBUSTION
- 8.- FACILITAR EL ARRANQUE EN FRIO
- 9.- MINIMIZAR EL CONSUMO DE ACEITE

Estas funciones requieren características especiales del lubricante, denominadas especificaciones, basadas en normas internacionales, que garanticen al fabricante del automóvil y por supuesto al usuario, que preservarán los mecanismos puesto a su custodia. Algunas de las características a especificar serán:

- 1.- VISCOSIDAD
- 2.. INDICE DE VISCOSIDAD
- 3.- ESTABILIDAD A LA OXIDACION
- 4.- PROPIEDADES ANTI DESGASTE
- 5.- PROPIEDADES INHIBIDORAS DE LA CORROSION
- 6.- PROPIEDADES DETERGENTES
- 7.- PROPIEDADES DISPERSANTES

- 8.- VOLATILIDAD ADECUADA
- 9.- CONTENIDO DE ADITIVOS ADECUADOS Y DE BUENA TECNOLOGIA
- 10.- REQUERIMIENTOS DEL FABRICANTE DE LA MAQUINA
- 11.- CUMPLIMIENTO DE ENSAYOS NORMALIZADOS EN MOTORES DE BANCO
- 12.- CONDICIONES FISICO QUIMICAS APROPIADAS AL USO Y CONTROLABLES

2.6.1.- CLASIFICACION DE LOS ACEITES PARA CARTER

Las normas internacionales, por las cuales se clasifica a los lubricantes, constituyen severas especificaciones que los refinadores deben cumplir para que se les permita colocar en sus envases leyendas alusivas a las mismas. En todos los casos deben mediar análisis de homologación, hechos por laboratorios reconocidos por las instituciones que otorgan la calificación. En primer lugar nos ocuparemos del Grado SAE, con el cual generalmente pedimos nuestro aceite para el automóvil.

2.6.1.1. S.A.E., CLASIFICACION POR VISCOSIDAD

El *GRADO SAE*, se refiere a la especificación desarrollada por la "Society of Automotive Engineers" en EEUU, que solo estipula la viscosidad del aceite que cataloga. La letra "W" (WINTER) que aparece en algunos grados acompañando a la sigla SAE, significa que esos aceites son preparados especialmente para servicio en climas fríos. Cuando aparece un grado doble, SAE 10W-30, estamos en presencia de un aceite multigrado, que cumple tanto la exigencia a baja temperatura, SAE 10W, como a alta, SAE 30 (Tablas 11 y 7).

A los valores de la Tabla 7 se agregan en la Tabla 11, para los grados W, la viscosidad en equipo simulador de arranque en frío (CCS) a otras temperaturas y la temperatura en °C denominada limite de bombeabilidad. El último valor, representa la menor temperatura a la cual el aceite puede ser alimentado permanentemente a la aspiración de la bomba de lubricación del automotor.

TABLA 11 COMPLEMENTO DE VISCOSIDADES SAE PARA ACEITES "W"

NUMERO SAE J 300-D	VISCOSIDAD MAXIMA EN CCS ASTM 2602		TEMPERATURA LIMITE DE BOMBEABILIDAD ASTM 3829 (1) °C MAXIMO
	°C	cP	
0W	-30	3250	-35
5W	-25	3500	-30
10W	-20	3500	-25
15W	-15	3500	-20
20W	-10	4500	-15
25W	-5	6000	-10

(1) Para 30000 cP máximo en miniviscosímetro rotativo, luego de un periodo de 16 hs a la temperatura especificada. El aparato tiene un rotor y un estator ensamblados y calibrados, siendo una medida de viscosidad absoluta.

El sistema de viscosidades y temperaturas de las normas SAE define una viscosidad máxima para una temperatura baja y, por otro lado, una máxima temperatura para una viscosidad que considera crítica. Los valores de la Tabla 11, en el CCS, nos dan las viscosidades máximas que cada tipo de aceite puede alcanzar a la temperatura especificada, para asegurar rotación a esa temperatura. La temperatura máxima límite para asegurar bombeabilidad es aquella que lleva a la viscosidad a 30000 cP, considerada máxima para una buena fluidez a través de filtros y conductos hasta la bomba de lubricación, evitando se formen vacíos que permiten el ingreso de aire y causen la cavitación de la bomba.

2.6.2. CLASIFICACION POR EL TIPO DE SERVICIO

El tipo de servicio, o sea la exigencia a la cual será sometido el lubricante, requiere para su evaluación ensayos más importantes y sofisticados que la simple determinación de la viscosidad u otros valores relacionados en equipos de laboratorio.

El sistema más aplicado es el API, "American Petroleum Institute", aceptado universalmente. Se basa en una serie de ensayos de banco, en motores fabricados en forma estándar, adaptados para poder medir las propiedades que se requiera en cada prueba. Se han definido previamente los ensayos que el aceite debe satisfacer para *CUMPLIR* con una determinada clasificación, por ejemplo el envase comercial del lubricante puede *especificar* que debe cumplir con:

ACEITE SAE-30
CUMPLE ESPECIFICACION API-S.B.

Lo cual significa :

VISCOSIDAD A 100 °C, mínima 9,3 cSt - máxima < 12,5 cSt*
CUMPLE ENSAYO CRCL-38**
CUMPLE SECUENCIA ASTM IV**

*Tabla 7

**Tabla 12

TABLA 12 CLASIFICACION API ACEITES DE CARTER, MOTORES A NAFTA

CATEGORIA DE SERVIC.	S.B.	S.C.	S.D.	S.E.	S.F.	S.G.
ENSAYO MOTOR						
CRCL-4 ó 38	X	-	-	-	-	-
CRCL-38	-	X	X	X	X	X
SECUENCIA ASTM IIA						
" " IIIA	-	X	-	-	-	-
" " IV	X	X	X	-	-	-
" " V	-	X	-	-	-	-
" " IIB -	-	-	X	-	-	-
" " IIIB	-	-	X	-	-	-
" " VB	-	-	X	-	-	-
" " IIB/C/D	-	-	-	X	-	-
" " IIIC/D	-	-	-	X	-	-
" " VC/D	-	-	-	X	-	-
" " IID	-	-	-	-	X	X
" " IIID	-	-	-	-	X	-
" " IIIE	-	-	-	-	-	X
" " VE	-	-	-	-	-	X
CATERPILLAR L - I	-	X	-	-	-	-
" " 1 H 2	-	-	X	-	-	X
FALCON RUST	-	-	X	-	-	-
MOTERES A LOS QUE SE INDICA C/GRADO (aprox.)	ANTER. 1964	1964/ 67	1968/ 71	1972/ 79	1980/ 88	DESDE 1990

El ensayo CRCL-38 se realiza en un motor Labeco monocilíndrico con ignición a bujía. Se opera durante 48 hs a altas temperaturas y altas velocidades, evaluándose la resistencia a la oxidación, corrosión sobre cojinetes de aleaciones de cobre y plomo, como los depósitos formados.

La Secuencia ASTM IV, opera sobre un motor V-8, marchando en forma cíclica 2 horas por dos de parada, por 24 horas, sin aplicar carga. Se evalúa el desgaste de levas y botadores con una sobre carga del 33 % sobre los resortes, en condiciones de alta temperatura de agua, de aceite y alta velocidad.

Los ensayos se van haciendo cada vez más exigentes, a medida que se adelanta en la clasificación, además el sistema es dinámico y constantemente se van agregando categorías y nuevos ensayos acompañando los avances tecnológicos.

Las normas API sobre lubricantes para motores a naftas llevan la letra "S", como API-SJ, en una de las últimas versiones. Con un criterio similar, para motores Diesel se utiliza la letra "C", en una clasificación que va desde API-CA hasta CF en el último tiempo.

Como puede observarse las reales condiciones de uso de los lubricantes se evalúan en motores de banco, lo mismo que las bondades de los *paquetes* de aditivos que se les agrega. Las determinaciones simples de laboratorio, solo tienen el valor de controlar, durante la fabricación, que se ha cumplido con las proporciones o cantidades previamente determinadas de cortes bases o aditivos específicos. Durante el uso tendrán algún valor en determinar contaminaciones o deterioro, permitiendo en algunos casos diferenciar calidades por viscosidad entre alternativas no comprometidas.

La clasificación API ha ido evolucionando desde 1947, donde se llamó a los lubricantes:

- REGULAR: Minerales puros con aditivos mejoradores de escurrimiento y viscosidad.
- PREMIUM: Idem, con más aditivos anticorrosivos, antioxidantes y ligeramente detergentes. Esta clasificación incluía el uso en motores a nafta y diesel. Servicio moderado
- HD(Heavy Duty): Idem, francamente anticorrosivos, antioxidantes y detergentes. Para nafteros y diesel. Servicio severo.

Si bien hoy la nombrada clasificación es obsoleta, el uso y la costumbre hacen que aún se la mencione en algunos medios. Es de destacar la denominación de HD Suplemento 1, que apareció a partir de 1968, haciéndose muy popular y que continúa apareciendo frecuentemente en la bibliografía a pesar de haber sido superada. Los HD Suplemento 1, se formulaban para un nivel de alta severidad de servicio, funcionando con combustibles de alto contenido de azufre.

Además de la API se utilizan, en lo referente a la calidad de los lubricantes, las normas MIL, normas militares norteamericanas de la "US Army Ordinance", cuya equivalencia corresponde a:

API SA	MIL-REGULAR
" SB	MIL-PREMIUM
" SC	MIL-L-2.104B
" SD	MIL-L-2.104B
" SE	MIL-L-46.152
" SF	MIL-L-46.152B
" CA	MIL-L-2.104B
" CB	SUPLEMENTO 1
" CC	MIL-L-2.104BB
" CD	MIL-L-45.199B

Las actuales especificaciones API en realidad son compartidas por la ASTM y la SAE, estando en plena vigencia las MIL-I-2104C y D, tanto como las MIL- I-46.152A y B.

Las grandes marcas de constructores de automotores, considerando las condiciones de lubricación específicas para sus vehículos, han desarrollado *especificaciones*, adoptando en parte los ensayos de las normas MIL o API, financiando ensayos con sus propios motores para completar sus requerimientos de calidad. Entre las más importantes podemos mencionar:

CATERPILLAR TRACTOR Co	: MIL L-45.199, menos el ensayo CRC-L-38
FORD,ESE-M2C-101C	: MIL-L-46.152, menos Caterpillar - 1H
GENERAL MOTORS, 6136 M	: MIL-L-46.152, menos Cat. 1H y CRC-L-38
DAIMLER BENZ, DB226.01	: MIL-L-46.152A, API SE/CC

Como ejemplo de norma MIL, en la Tabla 13 se resume la L-46.152A, mencionada anteriormente.

Las denominadas secuencias surgieron de los trabajos de la A.M.A, (AUTOMOBILE MANUFACTURES ASSOCIATION) y la ASTM, que comenzaron en 1956. Se denominan secuencias porque las tres primeras se realizaban, cuando se inicio su aplicación, una a continuación de la otra sobre el mismo motor sin abrir. Una de las últimas especificaciones para las secuencias se da en la Tabla 14, conjuntamente con otras determinaciones de banco mencionadas, advirtiendo que la dinámica de los organismos que establecen las especificaciones y los adelantos tecnológicos constantes, hacen variar frecuentemente las determinaciones y los valores.

En Europa se utilizan las especificaciones de la C.C.M.C.(Comité de Constructores del Mercado Común), cuyos límites consideran las generalmente mayores compresiones de los motores europeos, de menor cilindrada y mayores revoluciones que los norteamericanos.

Los lubricantes para el motor Diesel, API-CA/CF, se muestran en la Tabla 15, con su correspondiente relación con las normas MIL.

La categoría CA prácticamente esta en desuso, dado que solo asegura protección al operar con un gas oil de menos de 0,5 % en peso de azufre y condiciones de servicio moderadas, poco compatibles con los modernos motores diesel. La Clasificación CF-4, corresponde a aceites que pueden catalogarse de universales, cubriendo toda la gama de posibles usos. Es de esperar algún contenido de aceite sintético, sobre todo si corresponde a un multigrado 15W-40.

La norma ASTM D 4485-98 "Standard Specification for Performance of Engine Oil" (8.28) cubre los documentos activos de la API, consensuados con la ASTM, en cuanto a la "performance" de los aceites lubricantes. Se incluyen especificaciones para servicio pesado y liviano, tanto para automóviles, camionetas o camiones en todos sus tipos, nafteros y Diesel. Resulta el intento de homologación más importante, si bien no cubre otras especificaciones como la ILSAC (International Lubricant Standarization and Approval Committee), la ACEA (Association des Constructeurs Europeans D'Automobiles") o la CCMC.

Dada la movilidad que caracteriza al ASTM, la norma D 4485 no muestra clasificaciones obsoletas o aquellas para analizar las cuales no son accesibles aparatos o patrones de referencia, tales como:

SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG.
CA, CB, CC, CD, CDII, CE.

El grado SG no es incluido por cuanto la API hasta fines de diciembre de 1995 no había licenciado los símbolos para el uso.

Para el año 1998 ASTM mantiene activos los grados SH, SJ, CF-4, CF, CF-2, CG-4. Agregando para todos los grados el concepto de Conservación de la energía("Energy

Conserving”), definida por el método ASTM D 6202-97.

La API, menciona la norma D 4485, ha desarrollado símbolos sobre los cuales se pueden obtener licencias para ser usados en los envases comerciales de los fabricantes de aceites lubricantes. Los símbolos y la forma de obtener las licencias de uso aparecen en la publicación del API - 1509.

TABLA 13 ESPECIFICACIONES DE LA NORMA MIL-L-46.152A

GRADO SAE	10	30	10W-30	20W-40
VIS.100°C, cSt				
MINIMO	5,6	9,3	9,3	12,5
MÁXIMO	7,4	12,5	12,5	16,3
VISC. A -18 °C, cSt				
MÁXIMO	2500	-	2500	10000
CONGELACION, °C				
MÁXIMO	-32	-18	-32	-23
ASTM			MERITOS	
SECUENCIA II D			8,5	
HERRUMBRE MEDIA MAX.			NADA	
PEGADO BOTADOR.ES				
ASTM				
SECUENCIA II D				
% AUMENTO VISC. A LAS 40 horas A 40 °C MAX.			375	
LODO MAX.			9,2	
LACAS DEL PISTON MAX.			9,1	
DESGASTE LEVAS Y BOTADORES			NADA	
ESCAMADO			51	
DESGASTE MEDIO MAX. MICRONES			102	
DESGASTE PUNTUAL MAXIMO MICRONES				
CATERPILLAR 1-H-2				
MAX. ENSUCIAMIENTO GARGANTA SUPERIOR, %			45	
PESO TOTAL DE LOS DEPOSITOS, MAX.			140	
PERDIDA DE HOLGURA LATERAL DE LOS AROS, MICRONES, MAXIMO.			12,7	
CRC-L-38				
PERDIDA DE PESO EN COJINETES mg, MAX			40	
ASTM				
SECUENCIA V D				
OBSTRUCCION DEL ARO DE LUBRICACION, % MAX.			10	
OBSTRUCCION DEL FILTRO, % MAX.			7,5	
PEGADO DEL ARO DE FUEGO LACAS			NADA	
LACAS			6,4	
MEDIA DE FALDA DE PISTON, MAX6,3				
MEDIA DE MOTOR, MAX.9,2				
MEDIA DE LODOS EN EL MOTOR, MAX				
DESGASTE DE LEVAS			51	
MEDIA EN MICRONES, MAX			102	
PUNTUAL MAXIMO, MICRONES				

TABLA 14 ENSAYOS DE ACEITES LUBRICANTES EN MOTORES DE BANCO

NOMBRE DEL ENSAYO	MOTOR	DURACION DEL ENSAYO	CONDICIONES DE MARCHA Y PROPOSITO DEL ENSAYO
CRC L-38 ASTM D.5119	Labeco CRL, a bujías, monocilíndrico	48 hs	Opera a altas temperaturas y alta velocidad, evalúa resistencia a la oxidación, corrosión cojinetes Cu , Pb y depósitos.
SECUENCIA II D ASTM D.5844	Oldsmobile Año 1978 3,6 Lit. V6	32 hs	Opera a bajas temperaturas. Evalúa las características antiherrumbre, anticorrosivas y tendencia a la formación de depósitos.
SECUENCIA III E ASTM D.5533	Idem	64 hs	Opera a alta temperatura y alta velocidad. Evalúa propiedades antioxidantes, antidesgaste, y tendencia a la formación de lodos (sludge)
SECUENCIA V E ASTM D.5302	Ford Pinto Año 1980, 2,3 litros, 4 cilindros	192 hs	Opera a temperaturas y velocidades bajas y medias, cíclicas, simulando "servicio puerta a puerta". Evalúa tendencia a la formación de depósitos, obstrucción de filtro de aceite y formación de barnices en pistón.
CATERPILLAR 1-H2	Caterpillar Diesel, sobrealimentado monocilíndrico	480 hs	Opera a velocidades y cargas medias, con temperaturas moderadas. Evalúa propiedades de detergencia y antidesgaste. Determina el efecto del aceite sobre el pegado de aros, desgaste y depósitos.
CATERPILLAR 1-G2	Idem	480 hs	Incrementa la severidad de la operación con respecto a la anterior, aumentando carga y temperatura. Evalúa las mismas propiedades.
CATERPILLAR 1-D	Idem gas oil c/1 % s	480 hs c/cambio aceite c/120 hs	Operando con severidad media. Evalúa las mismas propiedades.

TABLA 15 CLASIFICACION DE LOS LUBRICANTES PARA EL MOTOR DIESEL

CLASIFICACION API	MILITAR	TIPO DE SERVICIO
CA	MIL-L2.104 A	Operando a condiciones moderadas, con combustible de buena calidad. Aspiración normal.
CB	Suplemento 1	Operando en condiciones moderadas, con combustible de menor calidad. Aspiración normal.
CC	MIL-L2.104 B	Operando en condiciones severas, sobrealimentado y en servicio pesado.
CD	MIL-L45.199 B	Operando en condiciones severas, sobrealimentado, en servicio pesado y con gas oil de alto azufre.
CE	MIL-L46.152 C	Operando en condiciones severas, turboalimentado, servicio pesado, con alta carga y alta velocidad.
CF	MIL-L2.104 E	Operando en condiciones severas, motores diesel rápidos, con combustibles con mediano contenido de azufre.
CF-4	MIL-L46.142 E	Operando en todas las condiciones y para todos los motores.

Los lubricantes formulados para cumplir con las normas API F-4, son ofrecidos por los fabricantes para motores a nafta tanto como para Diesel. En la Tabla 16 se da un ejemplo de un aceite del mercado nacional ofrecido para cumplir con los niveles de servicio F-4 y SG, si bien hasta 1998 la caracterización SG no fue homologada por ASTM.

Por las características del aceite de la Tabla 16, se deduce que el mismo es totalmente sintético, aclarándose que tales lubricantes son compatibles con los minerales derivados del petróleo. El aceite de la Tabla 17 corresponde a un mineral puro, formulado para motores Diesel, que el fabricante aconseja también para nafteros, como forma de unificar a un solo tipo de lubricante una flota de vehículos. La clasificación de nivel API-CD II, lo ubica en una exigencia menor que el multigrado de la Tabla 16.

TABLA 16 ANALISIS TIPICO Y NORMAS DE SERVICIO ACEITE MULTIGRADO

ENSAYO	UNIDAD	METODO ASTM	LUBRICANTE DIESEL/NAFTA
GRADO SAE	-	-	15W-40
VISCOSIDAD A 40°C	CSt	D-445	107,2
VISCOSIDAD A 100 °C	CSt	D-445	14,5
VISCOSIDAD A -15 °C	CP	D-2602	3200
INDICE DE VISCOSIDAD	-	D-2270	139
PUNTO DE INFLAMACION	°C	D-92	221
PUNTO DE ESCURRIMIENTO	°C	D-97	-40
NUMERO DE BASE TOTAL (TBN)	mg HOK/g	D-2896	13
DENSIDAD A 25 °C	g/cm ³	D-1298	0,89
TEMPERATURA LIMITE DE BOMBEO	°C	D-4684	Inf. a -20 (-40)
ESPECIFICACIONES QUE CUMPLE	-	-	API SG/CF-4 CATERPILLAR TO-2 ALLISON C-4 MIL-L-2104 E MIL-L-46152 E
USO INDICADO	-	-	Motores a nafta, diesel y gas natural comprimido. Para todo tipo de servicio sobrealimentados o turboalimentados

La norma ASTM D 4485-98 resume los más modernos requerimientos (año 2000) para los aceites lubricantes según las categorías establecidas. La clasificación se hace en tres criterios; *S*, *C* y *Conservación de Energía*. *S* se mantiene para los vehículos a nafta, especificando dos, *SH* y *SJ*, grados superiores a los mostrados en la Tabla 12. La categoría *SH* tiene como mínima exigencia la *SG* (iguales Secuencias ASTM) de la Tabla 12, estableciendo más controles sobre depósitos indeseables, oxidación, etc. La *SJ* aumenta las exigencias de la *SH*, manteniendo las mismas secuencias ASTM.

Los grados *C* pasan a ser aceites para motores Diesel y nafta, considerando los grados *CF-4*, *CF*, *CF-2* y *CG-4*. Como puede observarse se han agregado los grados *CF-2* y *CG-4* a los indicados en la Tabla 15. A las exigencias de homologación se ha sumado el criterio de

conservación de energía, que no aparecía antes, según el Método ASTM D-6202, correlacionado con el EPA FTP 75 (EPA, Environmental Protection Agency, U.S.).

TABLA 17 ANALISIS TIPICOS Y NORMAS DE SERVICIO LUBRICANTES NORMALES

ENSAYOS	UNIDAD	METODO ASTM	MOTORES DIESEL	
GRADO SAE	-	-	30	40
VISC.A 100 °C	CSt	D-445	11	15
IND. VISC.	-	D-2270	98	98
PUNTO INFLAM.	°C	D-92	225	230
PUNTO ESCURRI.	°C	D-97	-18	-15
TBN	mg HOK/g	D-2896	11	11
ESPECIFIC. QUE CUMPLE	-	-	API CD II/SF MIL-L-2.104D (C,B y A) MIL-L-46.152C (B y C) CCMC D2/PD1 DAIMLER BENZ 227.0 ALLISON C3 CATERPILLAR TO-2	
USO INDICADO	-	-	Motores Mercedes Benz nuevos o rectificadas, que exijan nivel DB 227.0. Puede usarse en flotas mixtas (nafta , diesel). Al aprobar las Normas Caterpillar TO-2 y Allison C3, para cajas automáticas (uso en transmisiones), lo hacen apto para las mismas.	

Con el Método ASTM D 6202-97, también conocido como Secuencia VI, se cubre un procedimiento para la medida de la economía de combustible que el uso de un aceite lubricante puede representar en motores a ignición a chispa. El ensayo se conduce montando un motor de combustión interna sobre un dinamómetro, comparando el consumo de combustible, bajo condiciones especificadas, con el correspondiente a aceites patrones.

Los lubricantes pueden ser etiquetados dentro de las dos categorías, S y C, si cumplen con las exigencias de ambas. Además suma premios a un aceite el cumplir con la Secuencia VI. La publicación API-1509, fundamenta las combinaciones de grados a las que se puede aplicar.

2.6.3. LOS ACEITES MULTIGRADO

De acuerdo a la formula (2-3), el Indice de Viscosidad, IV, para aceites normales de IV igual o menor de 100, se calculaba según:

$$IV = 100 \frac{L - U}{L - H}$$

Conociendo los valores de la viscosidad a 100°C, mínimo en cSt de la Tabla 7, se puede calcular L y H de la tablas ASTM completas(condensado en Tabla 10).

Un IV de 95 es un valor aceptable para un aceite normal de mercado, luego la ecuación (2-3), puede reordenarse.

$$U = L - \frac{IV}{100} (L - H) \quad (2-7)$$

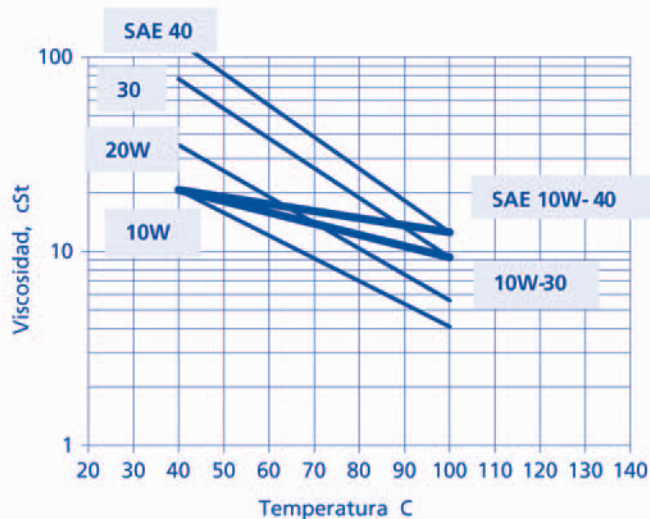
Donde U resulta ser la viscosidad en cSt a 40°C, de un aceite de IV y Viscosidad cinemática a 100°C conocidos. Con la ayuda de la ecuación (2-7) se construyó la Tabla 18, a los efectos de calcular las viscosidades a 40 °C de los aceites especificados en la Tabla 7 como SAE 10W, 20W, 30 y 40.

TABLA 18 VISCOSIDADES CINEMATICAS A 40 Y 100°C DE ACEITES MONOGRADO SAE 10W, 20W, 30 y 40.

SAE	VIS. 100°C (TABLA 7) cSt	L	H	L - H	IV	U VIS. 40°C cSt
10W	4,1	26,5	20,37	6,13	95	20,67
20W	5,6	50,87	34,32	16,55	95	35,15
30	9,3	130,4	74,57	55,83	95	77,36
40	12,5	216,6	114,7	101,9	95	119,79

Con los valores de la Tablas 18 se construyó la Fig. 37, sobre la carta viscosidad – temperatura.

Fig. 37- Viscosidad de Aceites Multigrado en comparación con Monogrados



Los aceites lubricantes multigrado deben cumplir con la especificación de menor grado a bajas temperaturas y con la de mayor grado a altas. La inclinación de las líneas gruesas en el diagrama Viscosidad – Temperatura de la Fig. 37 nos indican que las viscosidades a 40 y 100°C, necesarias, resultan imposibles de cumplir con índices de viscosidad 100 o menores.

La viscosidad a bajas temperaturas es función del corte de lubricantes usado, a menor punto de ebullición medio, menor viscosidad a, por ejemplo, -18°C (Tabla 7, método CCS). Por esta razón los multigrado se preparan con aceites livianos de buen IV(100/105). Como estos aceites a altas temperaturas no cumplen con los rangos mayores de la SAE, se agregan

aditivos que funcionan a alta temperatura aumentando la viscosidad más de lo normal, manteniéndose inactivos a bajas. El IV de un lubricante multigrado debe estar en las proximidades de 130.

Es de destacar que la extrapolación de las viscosidades de la Fig. 37 hacia las bajas temperaturas, para aceites muy aditivados que no cumplen la ecuación de Walther(2-2), como se mencionó, no arriba a resultados concordantes, por esta razón se perfeccionó el método CCS para arranque en frío.

2.7. LUBRICANTES PARA ENGRANAJES

Para su estudio a los lubricantes para engranajes, llamados también EP, Extrema Presión, se los divide generalmente en INDUSTRIALES Y AUTOMOTORES. Los engranajes industriales pueden ser de varios tipos, cilíndricos, cónicos, tornillo sinfín - corona, ya sean rectos o helicoidales. Los distintos engranaje, sumadas las características y exigencias del servicio, definirán una calidad para el lubricante, normalmente menor o menos exigente que para los del automotor.

En el caso de los automotores se suman los engranajes hipoidales, sometidos frecuentemente a altas cargas y desplazamientos por lo que requieren la mayor exigencia EP.

La función principal de un lubricante para engranajes es interponer una capa de aceite entre las superficies en movimiento, disipar el calor producido por la fricción y proveer protección al mecanismo contra la corrosión y contaminación con partículas extrañas. Para el caso de los automotores, las características generales de calidad, según el requerimiento a que serán sometidos no aparecen en la clasificación SAE de la Tabla 7 que, como se mencionó, solo indica viscosidad. La clasificación de servicio resulta en este caso también de aplicar las normas API, que tienen en cuenta aplicaciones específicas y las características físico químicas del lubricante para cumplir su cometido. En la Tabla 19 se resume la clasificación API para engranajes de automotores. Cada una de las calidades API responde a una secuencia de ensayos de banco, realizadas en laboratorios especializados mundialmente reconocidos, que otorgan **CERTIFICADOS DE CALIDAD** reconocidos por la API.

TABLA 19 CLASIFICACION API PARA LUBRICANTES DE ENGRANAJES

TIPO DE SERVICIO	CLASIFICACION API	ENGRANAJE Y TRANSMISION	ADITIVOS
LIGERO	GL-1 / GL-2 SIN FIN	ESPIRAL TORNILLO	SIN EP, SIN MODIF. FRICCION
MODERADO	GL-3	ESPI.,TORN. S/FIN,	LIGERO EP TRANS. MANUAL
SEVERO	GL-4	HIPOIDALES	MEDIO EP
MUY SEVERO	GL-5 / GL-6	HIPOD. DE CAMIONES	ALTO EP Y MODIF. FRICCION

Los engranajes bien diseñados, correctamente instalados y lubricados, prestan por largo tiempo un eficiente servicio. Cuando ocurren fallas, frecuentemente por desaliños o razones mecánicas, se deben estudiar los efectos de la falla para dar con la causa y proceder a corregirla.

Cada tipo de falla deja una pista característica sobre los dientes, que la AGMA Standard N° 110.04, (American Gear Manufacturers Association) categoriza para su individualización.

2.7.1. PROPIEDADES EXTREMA PRESION

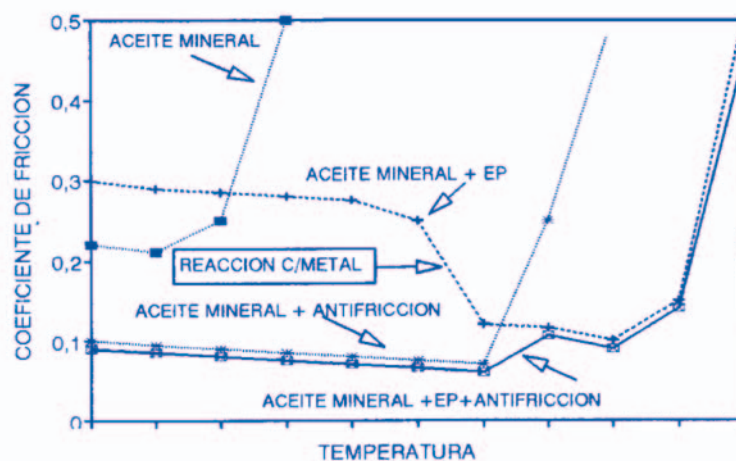
ALTO TORQUE Y BAJA VELOCIDAD (un camión subiendo una cuesta)- La lubricación se colocará principalmente en la zona 1 de la curva de Stribeck (Fig. 28), puede ocurrir la rotura del film y habrá ocasionales contactos metal - metal. Será necesaria una alta protección E.P..
ACEITE RECOMENDADO - API, GL-5/6.(Tabla 19)

ADITIVOS - EP De tipo SP (compuestos de azufre y fósforo) y modificador de fricción.

Con el ejemplo anterior hemos definido la necesidad de uso de un aceite EP, aditivado para esa calidad de servicio severo. Si bien la norma API explícitamente habla de los aditivos EP, o compuestos polares (antifricción), otros aditivos pueden ser agregados para mejorar propiedades de los aceites, aunque no estén indicados. En la Tabla 20 se muestran los principales aditivos para aceites de engranajes, con su materia activa y función.

En lo que respecta a las propiedades friccionales, *modificadores de fricción*, el uso de diferenciales autoblocantes obliga a un estudio más cuidadoso de su uso, puesto que los mecanismos incluyen "frenos", que necesitan algún control sobre la fricción. En casos de engranajes comunes la reducción de fricción redundará en disminución de temperaturas y pérdidas de energía.

Fig. 38- Lubricantes para engranajes, efecto combinado de aditivos



El correcto aditivado de un lubricante para engranajes o cojinetes, necesita el conocimiento previo de las condiciones de funcionamiento del mecanismo. Los aditivos que contienen ácidos grasos como agente solubilizante, solo pueden ser utilizados a bajas temperaturas, pues a altas se descomponen (150-200 °C), por esta causa se utilizan más en la industria. Los compuestos de azufre soportan hasta 600-700 °C, reaccionando con las superficies metálicas formando sulfuros, que poseen gran resistencia a la compresión. Los compuestos de fósforo y cloro forman capas de compuestos de reacción con las superficies, de igual forma que el azufre, en forma de metales fosforados y cloruros. Estos últimos están limitados a los 300 °C, pues se descomponen con formación de ácido, principalmente por hidrólisis en presencia de agua.

La lubricación en capa límite, que es el estado normal de un engranaje en su trabajo solicitado por grandes esfuerzos, depende de la tenacidad con que el aceite tiende a quedar adherido a las superficies en contacto. El aceite mineral puro de la Fig. 38 soportó la carga extrema del ensayo hasta la temperatura donde fue expulsado del mecanismo, de allí la fricción fue metal - metal. El mineral puro actuó con sus sustancias naturales, como hidrocarburos no saturados, compuestos de azufre, nitrógeno, oxígeno, en grandes moléculas con hidrocarburos pesados, que forman un film *adsorbido*, que solo permite trabajos livianos.

En el caso que se agregó antifricción de la Fig. 38, que además es un EP moderado, la sustancia activa es un compuesto polar, que puede tener carácter graso, el film lubricante se

fija por adsorción (fenómeno físico) y por *absorción*, o adsorción activada, que tiene el carácter de una unión química. La absorción aumenta con moderados aumentos de temperatura, lo que explica la disminución de la fricción en las primeras partes de las curvas. Una alta temperatura, mayor que para el mineral puro, romperá las uniones, descompondrá las moléculas grasas y la fricción aumentará a valores insostenibles por expulsión del lubricante.

TABLA 20 ADITIVOS PARA LUBRICANTES DE ENGRANAJES

LUBRICANTE	ADITIVO	SERVICIO	MATERIA ACTIVA
PARA: TODO TIPO DE ENGRANAJES	DEPRESOR PUNTO CONGELACION	DE ACUERDO A TEMP. AMBIENTES	TIPICA POLIMEROS DE METACRILATO, ESTIRENO
IDEM	MEJORADORES INDICE DE VISCOSIDAD	MANTENER VISCOSIDAD A DIFERENTES. T°	POLIMEROS DE METACRILATO, DE BUTILENOS
IDEM	ANTIESPUMA	EVITAR LA ENTRADA DE AIRE	POLIMEROS DE SILICONAS
IDEM	INHIBIDORES DE OXIDACION	EVITAR DEPOSITOS DE BARROS Y BARNICES	TIOFOSFATOS DE zN TIOFENATOS DE Ca
IDEM	INHIBIDORES DE CORROSION	PROTECCION AL ATAQUE DEL O ₂ DEL AGUA. PROTEGER ALCu Y ALEACIONES	BUTIL CRESOLES ORGANOMETAL DE Zn, Cd, Ba, Ni
IDEM	ANTIFRICCION	DISMINUYE TEMPERATURA	COMPUESTOS GRASOS, POLARES
ENGRANJES INDUSTRIALES	MODERADA EP	CONICOS Y ESPIRAL CONICOS	ORGANOMETALICOS DE Zn, S, Cl, Pb
AUTOMOTORES	MUY ALTA EP	HIPOIDES	QUIMICOS ACTIVOS DE S Y P (SP)

El EP, que tiene una moderada acción antifricción, llegada una temperatura intermedia, reacciona químicamente con el metal, produciéndose una disminución rápida y profunda de la fricción, los compuestos formados tienen carácter permanente y se necesitará una alta temperatura y alta fricción para "rasparlos" de las superficies y producir el daño del engranaje, aún después de haber expulsado el lubricante. Los compuestos de azufre y fósforo soportan las cargas, separan las superficies y evitan las soldaduras entre las asperezas metálicas en contacto.

Los aditivos con azufre y fósforo se denominan *SP*, reconociéndose para el *S* una mayor acción contra las soldaduras momentáneas entre asperezas y al *P* mayor protección contra el desgaste, siendo en la actualidad los más usados.

Como se observa en la Fig. 38, la combinación de los dos aditivos permite trabajar en las mínimas fricciones para todas las temperaturas, no obstante un lubricante con solo EP puede resultar mejor para un diferencial autoblocante, por proveer mayor fricción a bajas y moderadas temperaturas.

Los lubricantes para capa límite tienen también sus desventajas y deben ser usados cuando se los necesita por la severidad del servicio. En términos generales los compuestos que los forman, o los productos de las reacciones, pueden causar corrosión y ensuciamiento por

ser más inestables que los hidrocarburos del aceite mineral. Los “paquetes” de aditivos contienen los ingredientes necesarios para aliviar los efectos negativos, como antioxidantes o anticorrosivos. En otro orden, se pueden presentar problemas de compatibilidad con otros materiales del sistema, como gomas naturales o sintéticas, en tal caso habrá que cambiar el tipo de goma (nitrilo, neopreno). Si la incompatibilidad es con los metales, se puede intentar cambiar la concentración de EP, o las aleaciones usadas.

2.7.2 ENSAYOS PARA ACEITES EP

Los ensayos de catalogación API/MIL, son de banco, con motores de línea y reproducen la realidad con suficiente aproximación como para darles absoluto crédito. Volvamos al ejemplo con el que comenzamos este capítulo, “alto torque y baja velocidad”, recomendamos un lubricante que cumpla con API, GL-5/6,(GL-6 está en desuso). Entre otros, para dar con esta calificación, el aceite debe pasar los ensayos de motor de las normas API GL-5 y MIL-L-2105-D, estos últimos resumidos en la Tabla 21 (ver Tabla 7).

TABLA 21 ENSAYOS DE MOTOR DE LA NORMA MIL-L-2105 D

GRADO SAE ENSAYO	REQUERIMIENTOS	75W	80W-90	85W-140
CRC L-33	ENSUCIAMIENTO GENERAL Y CORROSION. ENSAYO MOTOR DE 7 DIAS	X	X	X
CRC L-37	ALTA VELOCIDAD Y BAJO TORQUE. ALTO TORQUE Y BAJA VELOCIDAD	X	X	-
CRC L-42	CARGA DE EJE, CHOQUE Y VELOCIDAD, ALTERNANDO.	X	X	-

CRC L-37 (Coordinating Research Council, grupo de investigación que da soporte técnico al API y a SAE).- Motor V8, diferencial DODGE de 7 Tn. 1º secuencia, 100 minutos a alta velocidad y bajo torque (simula lanzado en ruta). 2º secuencia, 24 hs a baja velocidad y alto torque(un coche empujando una pesada casa rodante). Resultado: estudio del estado del engranaje. Tipo de fallas: acanalamiento, ondeado o fatiga superficial (pitting) del engranaje.

CRC L-42 (velocidad y carga de choque, cambio brusco de velocidad). Motor V8, diferencial Spicer Modelo 44-1. Secuencias de cambios bruscos de aceleración en el orden de las 100 millas /hora, simula frenado brusco detrás de un vehículo mas lento y luego rebasarlo rápidamente. Resultado: estudio del estado del engranaje. Tipo de falla: rayado del engranaje.

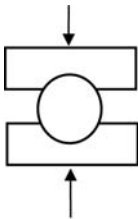
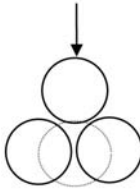
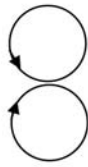
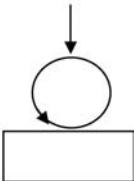
Los ensayos de laboratorio, más simples con equipos simuladores, no tienen una buena correlación con la realidad, en la actualidad se encuentran en uso cuatro, los cuales se sintetizan en la Tabla 22. En general no actúan en la acción de choque, no habiéndose comprobado que los resultados diferencien con propiedad distintas concentraciones y clases de aditivos. No obstante con la experiencia acumulada resultan de valor como contraste para la elaboración de los aceites y comprobar la calidad de los aditivos, en forma relativa. Los cuatro mencionados son ensayos con cojinetes de fricción, existiendo métodos que usan engranajes.

Uno de los equipos de laboratorio con engranajes es el FZG, que utiliza dos engranajes rectos con una alta relación de diámetros, la carga se transmite por un sistema hidráulico, pudiéndose variar la velocidad. Se realizan varias secuencias con distintas cargas y velocidades,

evaluándose el desgaste por la pérdida de peso de los engranajes muestras en ensayo.

Como en el caso de los cojinetes de fricción de los primeros ensayos de laboratorio mencionados, el FZG y otros similares existentes, no actúan sobre el choque, resultando dudosa la correlación con la realidad. Se informa en la bibliografía que los resultados tienen alguna coincidencia para ensayos que involucren los mismos lubricantes y aditivos, no permitiendo apreciar diferencias de calidad entre distintos aceites.

TABLA 22 ENSAYOS DE LABORATORIO PARA ACEITES EP

MAQUINA	DISEÑO	CARGA	RESULTADO	CONDICIONES
FALEX		MENOS 750 750-4500 LIBRAS	PERDIDA DE PESO	DESLIZAMIENTO
SHELL 4 BOLAS, ASTM D 2783		7 A 25 30 A 45 50 A 70 HERTZ	SOLDADURA	RODAMIENTO (DESLIZAMIENTO)
SAE		MENOS DE 125 125 A 550 LIBRAS	DESGASTE	RODAMIENTO (DESLIZAMIENTO)
TIMKEM ASTM D 2782		0 A 20 20 A 60 MAYOR 60 LIBRAS	R OTURA FILM	DESLIZAMIENTO

2.7.3. ACEITES PARA TRANSMISIONES AUTOMATICAS

En las transmisiones automáticas el sistema que relaciona la velocidad con el régimen de funcionamiento del motor es independiente del conductor, el cual solo deberá seleccionar la dirección de marcha. Tanto la maniobra de embrague, como los cambios de relación de marcha, dependerán de la solicitud del acelerador.

El corazón del sistema, la caja de cambios automática, en forma muy resumida, consiste en una serie de engranajes de tipo planetario con diferentes combinaciones, con dientes permanentemente engranados. Los cambios de marcha, desmultiplicaciones, se obtienen con el accionamiento de embragues, generalmente hidráulicos y cintas de freno, que bloquean o frenan determinados sectores del sistema. El enlace de la caja con el motor se efectúa con un embrague hidráulico de tipo convertidor de par, que permite un suave sincronismo.

La transmisión del movimiento en un embrague hidráulico se consigue enfrentando las toberas, sobre las que se impulsa aceite con una bomba centrífuga accionada con el motor, con los alabes de una turbina unida a la caja de velocidades. Los convertidores de par, esencialmente embragues hidráulicos, interponen un disco direccionador de flujo de aceite

entre la bomba y la turbina, para que la incidencia del chorro de aceite aproveche al máximo la energía de acuerdo a la posición de los alabes.

El complejo mecanismo que acabamos de describir, es un ejemplo de sistemas de difícil lubricación, puesto que el conjunto está colocado en un cárter, del cual toma una bomba de aceite que, previa filtración, lo envía al circuito de aceite. Este circuito debe transmitir potencia, presión para los mecanismos hidráulicos de embragues, baño para frenos húmedos, transferir y disipar calor, y lubricar todas las partes en movimiento.

Los aceites fabricados para estos requerimientos reciben el nombre de ATF, ("Automatic Transmission Fluids"), habiéndose desarrollado conjuntamente con los mecanismos desde aproximadamente 1940. Actualmente se utilizan no solo para las transmisiones automáticas, sino para modernas cajas manuales, dirección hidráulica o asistida, diferencial y diversos acoplamientos y variadores de velocidad.

Para satisfacer las exigencias que le imponen las múltiples tareas que el mismo aceite debe realizar, el lubricante moderno para transmisión automática, ATF, debe cumplir severas especificaciones, de las cuales se da un ejemplo en la Tabla 23.

TABLA 23 ESPECIFICACIONES TÍPICAS LUBRICANTE ATF

ENSAYO	UNIDAD	METODO ASTM	ESPECIFICACION
VISCOS. A 40 °C	cSt	D-445	35,8
VISCOS. A 100 °C	cSt	D-445	7,8
INDICE VISCOS.	-	D-2770	161
VISCOS. -40 °C	cPs	D-2983	38000
PUNTO ESC. °C	°C	D-97	-40
HERRUMBRE	-	D 665-A	PASA
EXIGENC. DE ATF		GM DEXRON II-D TIPO A SUBFIJO A TIPO F (ANTIGUA)	PASA PASA

A las especificaciones mencionadas se suman la M2C166-H de FORD y los ensayos Allison C2 y C3. En términos generales los ATF se ubican en la clasificación SAE 20 ó 10W-20 en lo que respecta a viscosidad, por su función de aceite hidráulico asociada.

Un buen ATF será además resistente a la oxidación, compatible con los materiales del sistema, como sellos, platos de embrague, bandas de frenos húmedos, anticorrosivo con los metales. Tendrá la aceitosidad necesaria para el correcto acoplamiento entre las piezas, permitiendo el deslizamiento sin mucho gasto de potencia.

Las características friccionales resultan ser las más importantes de un ATF, debiendo respetar las especificaciones del fabricante del mecanismo a lubricar. Como ejemplo se han colocado en la Tabla 23 dos casos, GM *puede* especificar un ATF que pase el ensayo GM DEXRON, que es un lubricante con baja fricción a alta velocidad de desplazamiento entre discos de embrague, como se observa en la Fig. 39, mientras que FORD, *podría* preferir el Tipo F (actualmente obsoleto), que según la misma figura presenta alta fricción en esa condición. De lo que se deduce que los requerimientos están referidos al diseño del sistema, al tipo de frenos y embragues utilizados y por la tanto son especiales de cada transmisión. Actualmente se tiende a unificar los ensayos, resultando el DEXRON II-D y la M2C166-H de FORD, compatibilizados, los más utilizados, figurando en los requerimientos de la mayoría de los vehículos.

La Norma DEXRON II E, plantea exigencias en ensayos motor y de tipo físico - químico convencional, según se muestra en el resumen de la Tabla 24.

TABLA 24 NORMA DEXRON II E PARA FLUIDOS ATF

ENAYOS DE LABORATORIO	METODO	REQUERIMIENTO	INTERPRETACION Y/O CONDICIONES
COLOR	ASTM D - 1500	60 - 80	
ESPECTRO INFRARROJO	ASTM E - 168	REPORTAR	
VISCOSIDAD CINEMATICA	ASTM D - 445	REPORTAR A 40 Y 100 °C	
PUNTO DE INFLAMACION	ASTM D - 92	MÍNIMA 160 °C	
VISCOSIDAD BROOKFIELD	ASTM D - 2983	REPORTAR A 10 °C 1500 cP A -20°C máx 5000 cP A -30°C máx 20000 cP A -40°C máx	
ESAYO DE HERUMBRE	ASTM D - 665	DEBE PASAR	
ENSAYOS EN MOTORES DE BANCO			
CARACTERISTICAS ANTIOXIDANTES	HYDRA – MATIC 4L60	Mide depósitos de barros, barnices y corrosión, por comparación con fluido de referencia	Se utiliza una caja turbo Hydra - Matic de tres velocidades, accionada con motor eléctrico de r.p.m. constantes. Duración del ensayo 300 horas
ESTABILIDAD OPERATIVA	HYDRA – MATIC 4L60	Mide el aumento del tiempo para ejecutar los cambios por deterioro del fluido. Se compara estado físico de las partes con un fluido de referencia.	Se utiliza la misma caja anterior, accionada con motor de combustión interna. Se provocan cambios y rebajes cíclicos. Duración del ensayo, 20000 ciclos descargando potencia sobre un dinamómetro.
CARACTERISTICAS FRICCIONALES	HYDRA - MATIC 4L60/3T40	Mide las características friccionales en un embrague acoplado a un motor y volante. Se acelera el motor y volante, se aplica el embrague, que toma toda la energía sobre sus discos (zunchos) hasta provocar el acople (detener el desplazamiento entre partes). Se toma el tiempo de acople.	El ensayo se hace sobre 100 horas de trabajo. Se especifican los tiempos de acople.

La clasificación API, (GL-1/6), es solicitada en los lubricantes para transmisiones industriales o para transmisión manual, más que para los ATF, dado que los de tipo GL-5/6, que son los de mejor calidad y por tanto para automotores, no cumplen generalmente con los requerimientos particulares de los fabricantes de los mecanismos automáticos, que tienen sus propias especificaciones en muchos aspectos.

A partir de 1973, los dos principales fabricantes de transmisiones automáticas han evolucionado según:

FORD:	MERCON".....	1987 – 1993
	MERCON(93).....	1993 – 1996
	MERCON"V	1996 –
GM :	DEXRON" - IID..	1973 – 1992
	DEXRON – IIE....	1993 – 1994
	DEXRON" - III	1994 –

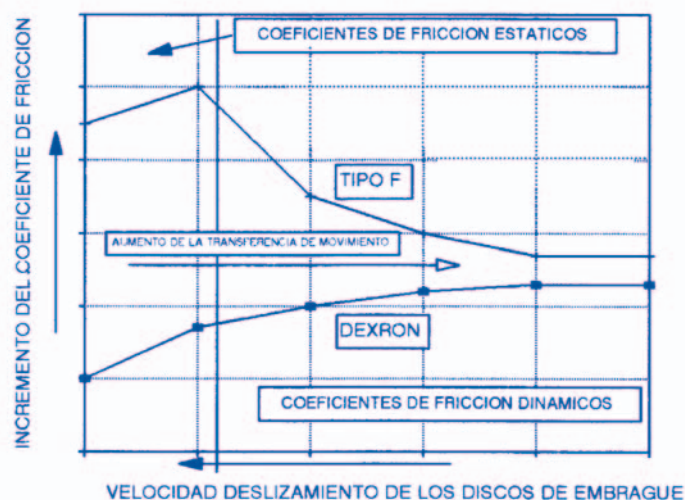
2.8. LUBRICANTES NO MINERALES

Los aceites de petróleo, denominados aceites minerales, han sido usados por más de 100 años para cubrir necesidades de servicio en la mayoría de las aplicaciones de lubricación, dado su buen funcionamiento y facilidad de obtención en distintas variedades. No obstante otros líquidos pueden ser usados para aplicaciones específicas y actualmente se nota un avance importante de los lubricantes sintéticos en el automotor.

Los aceites sintéticos no representan una novedad, ya que si bien eran conocidos antes, su desarrollo en escala industrial se produce en la Segunda Guerra Mundial. La falta de petróleo de Japón y Alemania fue la incentivación para el desarrollo nombrado. Durante muchos años la ecuación económica no favoreció a los aceites sintéticos, como tampoco la tecnología sobrepasaba la mayoría de las prestaciones de los minerales.

La Tabla 25 muestra las ventajas y desventajas de los principales aceites no minerales. Los aceites naturales pueden ser vegetales o animales, formados en su mayoría por ésteres orgánicos. La característica principal es su buena lubricación límite, pero presentan muy baja estabilidad térmica y a la oxidación. En términos generales podemos decir que los aceites de colza y sebo son usados en maquinado y el aceite de castor en fluidos hidráulicos.

Fig. 39- ATF, Características friccionales



Los di ésteres fueron los primeros lubricantes sintéticos usados masivamente, inclusive, por su alta estabilidad térmica y a la oxidación, superaron a los minerales en la lubricación de turbinas de gas. Los motores de los aviones a reacción supersónicos demandan ésteres más complejos, como ésteres polifenilos o triésteres.

Cuando se trata de propiedades específicas a cubrir con un lubricante, la Tabla 26 puede ser usada para seleccionar el aceite que mejor se adapte a ellas, siempre deberá compararse con un aceite mineral, puesto que normalmente puede cumplir la misma o similar función a menor costo.

Las emulsiones, que pueden ser directas o inversas, aceite en agua o agua en aceite, respectivamente, constituyen una clase particular de lubricantes, denominados también *fluidos que contienen agua*. Las emulsiones inversas se utilizan como fluidos hidráulicos, tienen buenas características lubricantes y resistencia al fuego. Las emulsiones directas se usan cuando es fundamental el enfriamiento del lugar de trabajo, como en los maquinados o corte de metales, donde la temperatura del aceite debe mantenerse por debajo de los 85 °C por recirculación. Para ambas emulsiones podemos decir que su uso no es recomendable para mecanismos donde la principal función del aceite es la *lubricación*.

TABLA 25 ACEITES NO MINERALES

TIPO DE ACEITE	COMPARACION CON ACEITES MINERALES	
	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ACEITES NATURALES	BUENA LUBRICACION LIMITE NO CARBURIZA EN EL MAQUINADO DE METALES	SE DESCOMPONE FACILMENTE FORMA LACAS Y LODOS
ESTERES ORGANICOS	ESTABLE A ALTAS TEMPERATURAS ALTO I.V.	ALGUN ATAQUE DE GOMAS Y PLASTICOS
POLIGLICOLES	MISCIBLE EN AGUA SE DESCOMPONE SIN FORMAR SOLIDOS DE DEGRADACION	BAJA TEMPERATURA MAXIMA DE USO
SILICONAS	ALTA ESTABILIDAD TERMICA ALTA RESISTENCIA QUIMICA	POBRE LUBRICACION LIMITE EN ACERO - ACERO
ESTERES FOSFATADOS	BUENA LUBRICACION LIMITE RESISTENCIA AL FUEGO	ATAQUE A GOMAS Y PLASTICOS POBRE ESTABILIDAD TERMICA
DIFENILOS CLORADOS	BUENA LUBRICACION LIMITE ESTABILIDAD QUÍMICA RESISTENCIA AL FUEGO	POBRE I.V. ATAQUE AL PLATICO Y ALEACIONES DE COBRE
FLUORCARBONO	MUY BUENA ESTABILIDAD QUIMICA Y TERMICA	POBRE I.V .ALTO PRECIO

TABLA 26 ELECCION DE UN LUBRICANTE POR PROPIEDADES ESPECIFICAS

PROPIEDAD REQUERIDA	ALTERNATIVAS EN TIPO DE ACEITE
ANCHO RANGO DE VISCOSIDAD	MINERAL, SILICONAS, POLIGLICOL
BUENA LUBRICACION LIMITE	NATURAL, GRASAS, MINERAL ADITIVADO, ESTERES, ESTERES FOSFATADOS
LARGA VIDA	MINERAL, SILICONAS, FLUORCARBONO, ESTER, POLIFENIL ETER.
ALTA ESTABILIDAD A LA TEMPERTURA	POLIFENIL ETER, FUORCARBONO, FUOSILICONA, ESTER.
RESISTENCIA AL FUEGO	EMULSIONES, FUORCARBONO, BIFENILOS CLORADOS, ESTER FOSFATADO
BAJO COSTO	EMULSIONES, MINERAL.

En la elección del lubricante se deben considerar los materiales no metálicos que pueden estar en contacto con el mismo, como se muestra en la Tabla 27.

A los lubricantes sintéticos que hemos mencionado debemos sumar los *hidrocarburos sintéticos*, como los aromáticos alquilados, polialfa olefinas (PAO) y polibutenos.

Las polialfa olefinas presentan características destacables como lubricantes, como por ejemplo fluidez a bajas temperaturas, que permiten mejor arranque del motor y economía de combustibles. El IV (130-160) es muy bueno, permitiendo preparar multigrados de rango corto sin aditivos. Por la baja volatilidad y su menor tendencia a la oxidación son menos contaminantes. Su estabilidad a altas temperaturas permite una mayor vida, haciéndolos recomendables para motores a gas natural comprimido que pueden funcionar a unos grados más que los de naftas. Así mismo son más resistentes al quemado, a la degradación a hidrocarburos más livianos que, sumado a su natural alto punto de inflamación, reducen los riesgos de incendio.

Los aceites lubricantes multigrado cuyo número API de invierno inicie en 0W ó 5W, deben ser formulados con bases sintéticas para cumplir las especificaciones actualmente vigentes.

TABLA 27 COMPATIBILIDAD DE LOS ACEITES CON DIVERSOS MATERIALES

GOMAS Y PLÁSTICOS		
TIPO DE ACEITE	SATISFACTORIO PARA :	NO SATISFACE. PARA :
NATURAL	MAYORÍA DE GOMAS, INCLUIDAS NATURALES, MAYORIA DE PLASTICOS	SBR, POLIETILENO Y POLIPROPILENO
MINERAL	GOMAS DE NITRILOS, NEOFRENO, VITON, EPR,	GOMAS NATURALES, SBR, POLIURETANOS.
ESTER	NITRILOS, VITON, NILON, PPS, POLIETERSULFONADO.	GOMAS NATURALES, SBR, NITRILOS, POLIACRILATOS, POLIURETANOS.
SILICONA	NITRILOS, VITON, NILON, PPS.	GOMA NATURAL, GOMAS DE SILICONAS,
ESTER FOFATADO	GOMAS BUTILICAS DE RESINAS CURADAS, EPR, PPS.	LA MAYORIA DE GOMAS Y PLASTICOS.

2.9 ADITIVOS MEJORADORES DE ACEITES LUBRICANTES

La moderna tecnología de los lubricantes es posible por el gran desarrollo de los aditivos. Una buena base de aceite de petróleo resulta en la actualidad un buen vehículo para los aditivos, que en definitiva posibilitarán se cumplan los exigentes ensayos de las normas API y permitirán a los mecanismos soportar la severidad de las condiciones de uso. No parece aventurado pensar que los lubricantes sintéticos en realidad llevan el porcentaje de aditivo al 100%.

En términos muy generales podemos decir que un aditivo es un grupo químico que imparte una determinada propiedad a la base lubricante. Como este grupo químico *puede* no ser soluble en aceite, hará falta agregarle una parte a la molécula soluble en hidrocarburo y un grupo que sirva de enlace a las dos anteriores.



Todo este conjunto forma una molécula compleja, generalmente motivo de marcas y patentes, en la cual, además de su papel específico, cada parte colabora a la mejora del lubricante.

La parte de la molécula compleja encargada de solubilizar el total en el aceite, generalmente un grupo alquilo, colabora en mejorar las funciones del lubricante, como modificar viscosidad, cocrystalizar con las parafinas o modificar funciones químicas. El agente de enlace puede ser azufre, fósforo, un compuesto de oxígeno, o un compuesto orgánico como anhídrido maleico o aldehído fórmico. El agente de enlace reacciona con el solubilizante formando una molécula de ácido orgánico, que es neutralizado por la parte activa, por lo general un compuesto básico. La Tabla 28 muestra los tres grupos que más frecuentemente se encuentran en los aditivos.

TABLA 28 EJEMPLOS DE ESTRUCTURAS DE ADITIVOS

GRUPO QUE PROVEE SOLUBILIDAD EN EL ACEITE	AGENTE DE ENLACE	PARTE BASICA
FRACCIONES DE PETROLEO	AZUFRE	SODIO
POLIBUTILENO	TRIOXIDO DE AZUFRE	POTASIO
ALCOHOLES SUPERIORES	CLORO	CALCIO
ALQUILBENCENOS	OXIGENO	ZINC
ALQUILFENOLES	FOSFORO	BARIO
POLIPROPILENOS	PENTASULFURO	MAGNESIO
COPOLIMEROS DE ETILENO	ANHÍDRIDO MALEICO	AMINAS
FRACCIONES DE PETROLEO	ALDEHIDO FORMICO	AMINAS

El uso de aminas esta reservado a casos donde se quiere reducir el contenido de cenizas del producto final. Por otro lado al preparar un lubricante con distintos aditivos, para distintas funciones, se debe hacer un ensayo de compatibilidad. La presencia de distintos aditivos puede dar tres casos: *indiferencia*, cada uno funcionara por su lado, *incompatibilidad*, se pueden producir reacciones indeseables entre ellos o, *sinergismo*, se complementan mejorando la actividad de cada uno.

Lo anteriormente mencionado haría aconsejable utilizar el mismo aceite en los recambios, si bien por regla general los proveedores de un mercado particular se preocupan de hacer sus lubricantes compatibles con la competencia, cumpliendo con las mismas normas.

2.9.1. INHIBIDORES DE OXIDACION, CORROSION Y DESGASTE

La oxidación se refiere a la descomposición o degradación del propio aceite por el uso, mientras que como corrosión se conoce al ataque sobre los metales de los cojinetes. La acción contra el desgaste tiene que ver con la formación de películas protectoras sobre las partes en movimiento.

La Tabla 29 resume composiciones típicas de aditivos cuyas funciones son reducir la oxidación del lubricante, que causa incremento de *viscosidad* y *TAN* (pág. 50), reducir la formación de barnices y lodos, como pasivar las superficies metálicas.

La función antioxidante se cumple en estos aditivos por reacción con los peróxidos y radicales libres, disminuyendo la velocidad de la cadena de reacciones.

A los mencionados en la Tabla 29 se suman:

N-fenil-alfa-naftilamina

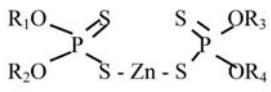
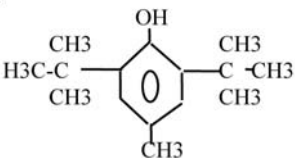
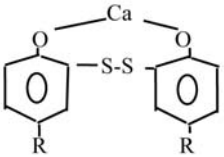
N-fenil-beta-naftilamina

Tetrametil diamino difenil metano

Acido antranilico

Terpenos sulfurizados

TABLA 29 INHIBIDORES DE CORROSION, OXIDACION Y DESGASTE

ADITIVO	ESTRUCTURA GENERAL	FUNCIONES
DITIOFOSFATOS EJEM. DITIOFOSFATO DE Zn OTROS CATIONES POSIBLES Cd, Ba, Ni	 <p>$R_{1/4}$ = GRUPOS ALQUILO</p>	Muy utilizado en aceites de cárter La descomposición térmica produce un depósito superficial antidesgaste. Se consume en la acción antioxidante. Es un aditivo de sacrificio. Apto para altas temperaturas
FENOLICOS EJEM. :DIBUTIL PARA CRESOL		Se usa en temperaturas moderadas porque sublima. Es pobre antioxidante y soluble en agua. Reacciona con el oxígeno, que destruye su capacidad antioxidante. Usos industriales y transformadores.
FENATOS METALICOS EJEM. : TIOFENATO DE Ca OTROS METALES POSIBLES Ba, Mg		Puede actuar como antioxidante y detergente, como grupos R se usa generalmente C ₁₀ , solubilizante. El disulfuro es antioxidante y anticorrosivo. Se informa como pobre antidesgaste. Temperaturas moderadas. Uso en compresores y transmisiones.

2.9.2.- ADITIVOS DISPERSANTES

La principal función de estos aditivos es mantener en suspensión, en el seno del lubricante, las partículas de carbón provenientes de la combustión imperfecta, sobre todo de los motores diesel. En el caso de los motores a nafta, especialmente en los servicios "puerta a puerta" de baja temperatura, debe dispersar los lodos húmedos, reduciendo la precipitación de depósitos y barnices.

En términos generales actúan por mecanismos físicos, vinculados a fuerzas polares, recubriendo las partículas indeseables y evitando se aglomeren al repelerse eléctricamente. La acción de los dispersantes es complementaria de los detergentes, actuando a bajas temperaturas impiden los depósitos en presencia de agua condensada, cuando los detergentes prácticamente no actúan, precisamente, por las bajas temperaturas. La Tabla 30 muestra los ejemplos más importantes de estos aditivos.

Se pueden mencionar, además de los nombrados en la Tabla 30:

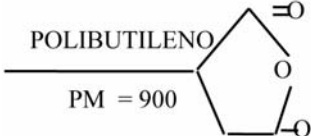
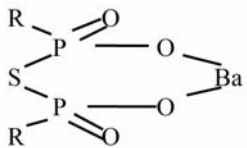
Amidas epóxicas

Amidas y poliamidas de alto peso molecular

Poliésteres de alto peso molecular

Sales amínicas de alto peso molecular de ácidos orgánicos

TABLA 30 ADITIVOS DISPERSANTES

ADITIVO	ESTRUCTURA GENERAL	FUNCIONES
POLIBUTILENOS EJEM. POLIBUTILENO- ANHIDRICO MALEICO OTROS GRUPOS POLARES: PENTASULFURO DE FÓSFORO BENCENO FENOL TRIOXIDO DE AZUFRE		El polibutileno es el solubilizante más importante de la tecnología de aditivos. El compuesto es incoloro como el agua y se descompone a unos 275 °C, sin dejar cenizas ni residuos.
FOSFONATO DE BARIO		En los años 50' fue uno de los más importantes, estando entre los denominados "MS". Se utiliza en cárter a alta temperatura. Deja cenizas.

2.9.3. ADITIVOS DETERGENTES

La función de los aditivos detergentes primariamente se vincula con la reducción de la formación de depósitos carbonosos y lacas en las ranuras propias de los motores, en condiciones de altas temperaturas. Así mismo evitan la acumulación de lodos en faldas de pistón, guías y vástagos de válvulas. Las altas temperaturas de los motores a combustión interna tienden a descomponer a los aceites lubricantes, en un proceso denominado oxidación, con formación de ácidos de alto peso molecular y otros residuos carbonosos y alquitranes que son los que se depositan en el motor.

Los aditivos detergentes tienen una alta alcalinidad, medida en TBN (pág. 50), que neutraliza los ácidos formados durante la degradación del lubricante y del azufre del combustible que puede pasar al cárter. Este efecto neutralizante colabora a minimizar la formación de lodos, impidiendo el pegado de aros, reduciendo las lacas y depósitos en general. Además, por sus características de alta alcalinidad y propiedades tensoactivas, puede desprender depósitos anteriores, manteniéndolos suspendidos en el aceite.

Como se mencionó al hablar de aditivos dispersantes, los detergentes necesitan que a bajas temperaturas se mantengan los residuos en suspensión, siendo esta la función de los dispersantes, que no impiden formación de lodos ni desprenden los ya formados, constituyendo la diferencia entre ambos.

Los primeros detergentes utilizados fueron los jabones de ácidos grasos superiores, tales como los estearatos, pero dada su baja estabilidad térmica comenzaban a descomponerse antes que el aceite, formando promotores de reacciones que degradaban prematuramente al lubricante.

Actualmente los principales detergentes son los sulfonatos, un ácido sulfónico neutralizado con una base de Ca o Mg. El grupo solubilizante generalmente es el polibuteno. Cuando el aditivo está preparado de tal forma de tener una alcalinidad en exceso con respecto a las relaciones estequiométricas, en forma de carbonato de Ca o Mg, se dice que el aditivo es de "base alta". Esta alcalinidad extra está disponible para neutralizar el ácido formado cuando se usan combustibles con alto contenido de azufre, sobre todo en motores diesel lentos. El TBN de estos aditivos puede ir de 300 a 400, resultando en un aceite con de 30 a 100 de TBN.

En los aceites de cárter se utilizan detergentes de moderada base alta, prefiriéndose el Mg como metal. El mencionado metal se presenta como más efectivo como agente

antioxidante, dando así mismo, según se informa, menores problemas de preingnición que el calcio.

Los aditivos de la estructura de los sulfonatos de metales dejan una apreciable cantidad de cenizas, más aún los de base alta, si la exigencia de los constructores de motores limitan esta cantidad, puede resultar conveniente el uso de aditivos sin cenizas. En tal caso la base será un amina y no un metal, como en el Polibutileno hidroxibencil poliamina. Al mencionado se pueden agregar como aditivos sin cenizas el polibutileno succinamida poliamina. En la Fig. 40 se muestran las estructuras químicas de algunos de los aditivos últimamente mencionados.

2.9.4. ADITIVOS MEJORADORES DEL INDICE DE VISCOSIDAD

El Índice de Viscosidad es una medida de la variación de la viscosidad con la temperatura de un lubricante. Un aditivo para mejorar esta propiedad es una sustancia de alto peso molecular que, agregada en pequeña proporción al aceite, produce un aumento de viscosidad generalizado, pero, por un mecanismo especial, mayores aumentos a altas temperaturas. Como el aceite al calentarse disminuye su viscosidad, el aditivo compensa en parte esta acción.

Todos los mejoradores de IV son polímeros de alto peso molecular, 5000 a 170000, siendo los más importantes los Poliisobutenos y los Copolimeros de alquil meta crilato. La intensidad de la resistencia al cizallamiento de las grandes moléculas depende de la energía de enlace carbono - carbono de la cadena principal. Esta energía es afectada por grupos laterales de tipo aromático, insertados en la gran cadena, que retiran electrones de las uniones. Cuando se necesitan mejoradores potentes, se utilizan polímeros con pocas funciones laterales, generalmente de polipropilenos, mientras que la propiedad se atenúa intercalando en la molécula, *a medida*, funciones laterales y polímeros de metacrilato. En la Fig. 40 se representa una molécula de aditivo mejorador de IV.

El mecanismo de funcionamiento de la gran molécula se explica asumiendo que la misma permanece enrollada por las atracciones de fuerzas de Van Der Waals a bajas temperaturas, fuerzas que actúan *hacia adentro*, aportando poco a la viscosidad. A alta temperatura la molécula se despliega, en forma proporcional a este aumento, contribuyendo a la viscosidad total en forma efectiva por las fuerzas de Van Der Waals actuando *hacia el medio aceite* y aumentando la resistencia al cizallamiento.

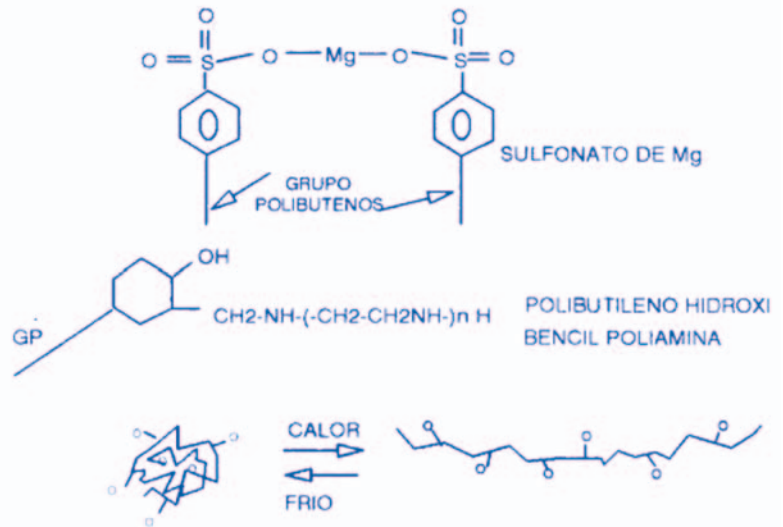
Se pueden agregar como mejoradores de IV, además de los mencionados, a las olefinas polimerizadas, polímeros de estireno alquilado, copolimeros, etc.

2.9.5. DEPRESORES PUNTO ESCURRIMIENTO Y ANTIESPUMAS

Los depresores del punto de escurrimiento tienen como función evitar el crecimiento de los cristales de parafinas a medida que desciende la temperatura. El denominado punto de escurrimiento mide la temperatura a la cual el aceite deja de fluir, por quedar atrapado en una red de cristales de parafinas que lo encapsulan. Evitando el crecimiento de esos cristales se permite al aceite continuar fluyendo a pesar de los pequeños núcleos formados. El ensayo se realiza, según se observa en la Fig. 41, con un tubo que contiene la muestra, un termómetro, sumergiendo el conjunto en un baño a baja temperatura. Volcando el tubo en los tiempos que el método marca para observar si el lubricante fluye. Cuando deja de fluir se toma la temperatura y se informa como punto de escurrimiento.

Al dejar de fluir el aceite no significa que todo ha congelado, los lubricantes minerales son una mezcla de componentes, en su gran mayoría hidrocarburos, entre los cuales "algunos congelan". Cuando los "congelados" alcanzan a formar la red que ocluye al resto, nos encontramos con el punto de escurrimiento, más precisamente con el punto donde deja de escurrir.

Fig. 40- Aditivos de aceites lubricantes, estructura química



Como aditivos depresores del punto de escurrimiento podemos mencionar a los polímeros de alquil metacrilato, polímeros de poliestireno alquilado y otros polímeros o copolímeros.

Los inhibidores de espuma son sustancias que en pequeñas cantidades modifican la tensión superficial del aceite, causando una disminución que le permite liberar el aire evitando la formación de burbujas. El aditivo clásico para esta función lo constituyen los polímeros de siliconas.

La observación de las sustancias químicas que forman los aditivos, nos permite suponer que una buena ingeniería de estructuras permitiría fabricar aditivos multifuncionales, combinando adecuadamente las partes de la molécula compleja. Esto es así, ofreciéndose en el mercado aditivos que cumplen varias de las funciones en una sola molécula o en la mezcla de moléculas resultante de la obtención industrial de aditivos.

No se han mencionado los aditivos E.P. Extrema Presión, tratados con amplitud en el Capítulo 2.7.1.

3. LUBRICANTES INDUSTRIALES

De la gran variedad de aceites lubricantes de uso industrial, se van a tratar algunos aspectos de las aplicaciones en:

- Turbinas de vapor
- Mecanismos hidráulicos
- Compresores
- Transformadores

3.1. LUBRICANTES PARA TURBINAS A VAPOR

Conocidos como *aceites turbina*, los lubricantes para este tipo de servicio deben reunir especificaciones rigurosas en los aspectos relacionados con su uso en ambiente de humedad, temperatura y la presencia de metales catalizadores de descomposición (bronce, latón, óxidos de hierro, etc).

Cuando las turbinas trabajan acopladas a bombas centrífugas o generadores eléctricos, generalmente de alta velocidad y poca o moderada carga, se utilizan aceites normales de

viscosidad creciente a medida que disminuye la velocidad y aumenta la carga. En la Tabla 31 se muestran análisis típicos del mercado nacional para este servicio.

Fig. 41- Determinación Punto de Ecurrimiento

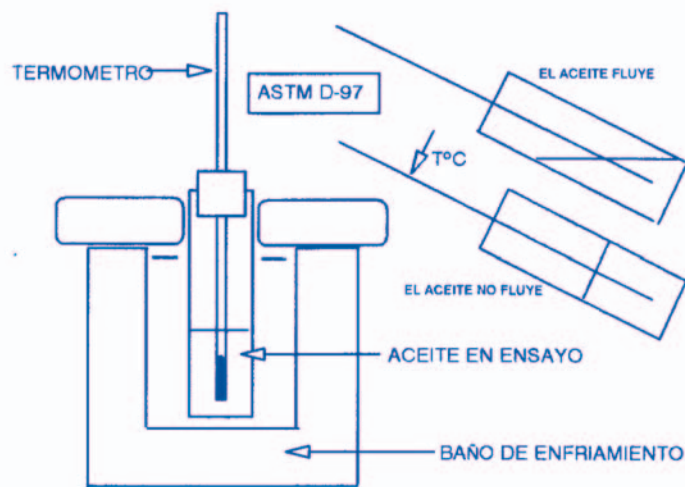


TABLA 31 ANALISIS TIPICOS ACEITES TURBINA NORMALES

ANÁLISIS / N°	Unidad	ASTM	1	2	3	4	5	6
Visc. a 40°C	cSt	D 445	32	45	53	67	79	100
Visc. a 100°C	cSt	D 445	5	6	7	8	9	11
Indice Viscosid.	-	D 2270	95	95	95	95	95	95
P. Inflamación	°C	D 92	206	210	210	215	220	225
Punto Ecurrimi.	°C	D 97	-9	-9	-9	-9	-9	-9
Herumbre	-	D 665	pasa	Pasa	Pasa	pasa	pasa	Pasa
Corros./Cu, 3hs	-	D 130	1a	1 ^a	1 ^a	1a	1a	1 ^a
N° neutralizac.	mg/gHOK	D 974	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Emulsión a 54,4°C	min	D 1401	40-37 -3(30)	40-37 -3(30)	40-37 -3(30)	40-37 -3(30)	-	-
Emulsión a 82,2°C	min	D 1401	-	-	-	-	40-37 -3(30)	40-37 -3(30)
Recomendación de servicio aproximada	-	-	Hasta 300CV, altas velocidades. Bombas, sopladores		Hasta 30000CV, menor velocidad (unas 3000rpm). Generadores, Grandes industrias		Hasta 50000CV, menor velocidad (unas 3000rpm). Generadores, Grandes industrias, Centrales térmicas	

Un caso particular resultan los aceites para turbinas de los motores de tracción de barcos, los aceites para turbinas marinas. En este caso, como en otros de gran potencia, la máquina rotante está acoplada a un reductor de velocidad, que también debe ser lubricado. Para casos de servicio severo, se aplican aceites similares a los Turbina de la Tabla 31, pero con aditivos de Extrema Presión, transformándose en Turbina EP.

Las principales propiedades que le transmiten las especificaciones de la Tabla 31 a los Turbina, con los aditivos necesarios para lograrlas son:

- Viscosidad adecuada para la carga, velocidad y tamaño.
- Inhibir la formación de herrumbre.
- Prevenir la corrosión sobre los metales y la formación de óxidos.
- Inhibir la oxidación del lubricante y la formación de lodos y gomas.
- Resistencia a la formación de espuma.
- Alta capacidad para separar el agua y el aire incorporado.

3.2. ACEITES PARA MECANISMOS HIDRAULICOS

Los aceites minerales de buen índice de viscosidad aditivados para entrar en las categorías de antioxidante, antiherrumbre y antiespuma, se utilizan como *fluidos hidráulicos*, o sea líquidos transmisores de potencia. Se usan en sistemas hidráulicos como controles hidrodinámicos, frenos, martinets, autoelevadores, embragues, etc. Los aceites ATF, son un caso particular de un hidráulico, dado que necesitan capacidades ampliadas a otros servicios del mecanismo a servir.

Ampliado la definición de fluido hidráulico, pueden actuar como tal otros materiales; agua, emulsiones de aceite y agua, esteres fosfatados, siliconas, etc. El uso particular y las condiciones de funcionamiento del mecanismo aconsejarán el tipo de fluido a utilizar.

El agua y, proporcionalmente a su concentración, las emulsiones de aceites, tienen bajo costo y buen comportamiento a la presión a soportar, resultando negativa la corrosividad y falta de lubricación que aportan. Las emulsiones agua - aceite resultan adecuadas cuando existe peligro de incendio en el servicio, puesto que tienen la capacidad de ser ininflamables.

Los aceites sintéticos y las siliconas tienen elevado precio y solo se utilizan en casos particulares, especialmente por temperatura, dado que pueden soportar de 150 a 300°C, mientras que los aceites minares no sobrepasan los 100°C.

En el mercado se ofrecen por grado de viscosidad, entre 22 y 320 cSt a 40°C, clasificación que establece la Norma ISO, existiendo también *Hidráulicos EP*. La "American Gear Manufacturers Association", en las normas AGMA 250.02 y 250.04, establece especificaciones para engranajes abiertos y cerrados respectivamente, con las cuales los fabricantes de aceites explicitan las cualidades de sus productos.

Las emulsiones aceite – agua, tienen aplicación en el maquinado, desgaste de piezas metálicas con herramientas duras, en este caso se comercializa un aceite denominado *soluble en agua*, que en realidad es *emulsionable en agua*. La característica de aceite *soluble* se logra con un agente emulsionable que favorece la dispersión del aceite en el agua. La función de la emulsión es refrigerar la herramienta de maquinado con el agua, facilitar el mojado y lubricar por parte del aceite.

3.3. ACEITES PARA COMPRESORES

Los aceites para compresores dependen de la maquina propiamente dicha y del tipo de servicio que la compromete. Una primera gran división habla de los compresores de aire o gas y de los compresores de máquinas frigoríficas.

Los compresores pueden ser alternativos o rotativos, de una o varias etapas, diferenciándose también por la potencia requerida para accionarlos. En baja potencia los sistemas de lubricación de los alternativos pueden ser por salpicadura, mientras que en alta se utiliza la circulación forzada de aceite. El lubricante debe actuar sobre los cojinetes y sobre el movimiento del cilindro, funcionando por sistema de carter. Para pequeños requerimientos de compresión la refrigeración puede ser por aire, mientras que para altas compresiones se utiliza agua de enfriamiento.

En el caso de los compresores rotativos la lubricación esta relacionada con los cojinetes, los cuales pueden ser lubricados con grasa en maquinas pequeñas y con aceite a presión para mayores prestaciones. Las altas compresiones requerirán enfriamiento por agua.

En la Tabla 32 se muestran análisis típicos de aceites para compresores, resultando una aproximación para condiciones normales de operación.

El tipo químico del gas a comprimir debe ser considerado al seleccionar el lubricante, los aceites minerales son adecuados para aire, hidrógeno, nitrógeno, gases nobles y con ciertos recaudos, como utilizar una mayor viscosidad, para gases del petróleo que son solubles en el aceite.

TABLA 32 ANALISIS TIPICOS ACEITES COMPRESOR

ENSAYOS	ASTM	TIPO DE COMPRESOR				
		Rotativo		Alternativo		
Visc. 40°C cSt	D 445	30	60	48	100	200
P. Inflam. °C	D 92	190	190	200	210	220
P. Escurr. °C	D 97	-9	-9	-9	-9	-9
Nº Neut. Mg HOK/gr	D 974	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
C. R. Conradson %p	D 189	0,30	0,30	0,35	0,4	0,4
Tipo de servicio aprox.	-	moderado	exigido	<10Kg/cc	<30Kg/cc	>30Kg/cc

En el caso de compresores de máquinas frigoríficas la selección está vinculada fundamentalmente a la temperatura y al tipo de refrigerante utilizado. En la Tabla 33 se dan una serie de análisis típicos para *lubricantes frigoríficos*, con alguna indicación de uso aproximada.

TABLA 33 ANALISIS TIPICOS ACEITE FRIGORIFICO

ENSAYOS	ASTM	1	2	3
Visc. 40°C cSt	D 445	32	46	68
P. Inflam. °C	D 92	170	170	188
P. Escurr. °C	D 97	-45	-27	-27
Nº Neut. Mg HOK/gr	D 974	0,05	0,1	0,1
Corros. S/Cu 3h, 100°C	D 189	0,35	0,4	0,4
Poder Dieléctrico kV	CEI	28	30	30
Aceite base	-	sintético	mineral	mineral
Tipo de servicio aprox.	-	Equipos a Freón herméticos	Pequeñas instalaciones industriales. Heladeras domesticas	Equipos industriales importantes

El poder dieléctrico, o rigidez dieléctrica, esta relacionado a las características aislantes de la electricidad de un aceite, que en el caso de unidades selladas, como en las modernas heladeras hogareñas, es muy apreciada.

Los aceites sintéticos son utilizados para las bajas temperaturas, encontrando aplicación en la actualidad los Polietilenos alfa olefinas, PAO.

3.4. ACEITES PARA TRANSFORMADORES

Los aceites para transformadores también son conocidos como aceites aislantes, su misión principal es mantener aislados los sistemas sometidos a tensión. Los internos de los transformadores cuentan con aislantes sólidos, los cuales generalmente son de materiales semi porosos, siendo otra función del aceite llenar los poros para evitar cámaras de aire con posibilidades de descargas o arcos eléctricos. La disipación del calor se encuentra entre las necesidades que aporta el aceite.

Los aceites minerales derivados del petróleo han demostrado ser excelentes aislantes para transformadores, interruptores y otros mecanismos eléctricos que funcionen en baño de aceite. La principal característica, la rigidez dieléctrica, es una propiedad natural de los productos de petróleo, que es severamente afectada por impurezas como sedimentos o agua. Para la preparación comercial de los aceites aislantes se debe seleccionar la naturaleza del petróleo y proceder a una rigurosa refinación, con métodos que preserven la rigidez dieléctrica natural y optimicen las características antioxidantes y antiherrumbre sin aditivos. En la Tabla 34 se muestran análisis típicos de aceites aislantes.

TABLA 34 ANÁLISIS TÍPICOS DE ACEITES AISLANTES

ENSAYO	UNIDAD	METODO	CON ADITIVO	MINERAL PURO
Viscosidad a 40°C	cSt	ASTM D 445	10,5	10,5
Punto de Inflamación	°C	ASTM D 92	142	142
Punto de Escurrimiento	°C	ASTM D 97	-20	-20
Tangente Delta a 90°	-	EIC 250	4 x 10 ⁻³	4 x 10 ⁻³
Poder dieléctrico	kV	EIC 156	32	32
Corrosión S/Cu 3h a 100°C	-	ASTM D 130	1a	1a
Envejecimiento 164 h				
Barros	%p	IEC 74	0,15	0,10
Índice de acidez	mg HOK/gr		0,40	0,25
Numero de neutralización	mg HOK/gr	ASTM D 664	0,03	0,03
Densidad a 15/15 °C	gr/cm ³	ASTM D 1298	0,880	0,880

Las especificaciones EIC se refieren a la "Comisión Electrotécnica Internacional", que emite normas para estandarizar este tipo de aceites.

No tratándose de un lubricante, la viscosidad no tiene la importancia que antes le otorgáramos. No obstante es significativa desde el punto de vista de la disipación del calor, que al ser por convección depende de la fluidez del aceite. Vinculado a esta misma propiedad, el punto de escurrimiento se limita para evitar que se dificulte a bajas temperaturas la fluidez. La acidez y el ensayo de corrosión limitan las posibilidades de ataque a los internos del transformador, afectando así mismo, por ser compuestos polares los que causan ataque, el carácter aislante del material.

El *poder dieléctrico o rigidez* es de fundamental importancia, ya que es la medida de la capacidad de cumplir la primer misión de un aceite aislante. Si bien existen varios métodos experimentales, todos se basan en aplicar una tensión variable a una muestra de aceite colocada entre dos electrodos. La tensión en kV que produce la chispa; que perfora el aceite según la expresión más usada, resulta ser la *Rigidez Dieléctrica (RD)* del material en ensayo.

Los aceites para transformador están sometidos a corrientes alternas, teóricamente en el período de mayor voltaje almacenarían energía, que en el de menor cederían para establecer un equilibrio. Dado que las ondas de intensidad de corriente forman con las del voltaje ángulos de fases de 90°, este valor se mantendría de tener un dieléctrico ideal. El

dieléctrico y el sistema en general no es ideal, se pierde parte de la energía en aumento de temperatura, provocando que el *ángulo de pérdida dieléctrica o tangente de delta*, sea menor de 90°. Las determinaciones de tangente delta antes y después de un período de inducción en condiciones de oxidación en laboratorio, se utilizan para evaluar el envejecimiento del aceite. Así mismo es una medida de control en cuanto a sus facultades durante el servicio.

El envejecimiento por el método EIC 174, mide la estabilidad a la oxidación del aceite sometido a una corriente de aire por 164 horas.

Algunos fabricantes de transformadores especifican aceite mineral puro para sus equipos, lo que supone una muy cuidadosa fabricación para que pase las especificaciones. La necesidad de agregado de sustancias extrañas a la naturaleza de los aceites de petróleo, puede deberse a una menor refinación compensada con aditivos. Las sustancias propias de la degradación del aceite y, en su caso, del aditivo, son conductoras, haciendo perder RD.

Previo a la elaboración de aceites lubricantes minerales se someten los petróleos crudos a ensayos de laboratorio, generalmente en plantas piloto, a los efectos de determinar la calidad y los rendimientos esperados. Como regla más común la refinería dispone de los procesos y operaciones necesarios, seleccionando la materia prima de acuerdo al diagrama de proceso y a las calidades requeridas.

4. OBTENCION DE LUBRICANTES

Al sistema completo que derivará en la obtención de los lubricantes para la venta, generalmente se lo denomina *Complejo de Lubricantes*. Arbitrariamente se puede dividir al "complejo" en dos partes, plantas básicas y de refinación, como se ve en la Fig. 42, agregándose la casa de mezclas, lugar donde se realizan las mezclas de los cortes básicos para lograr la calidad final, de acuerdo a cada clase de lubricante elaborado.

COMPLEJO DE LUBRICANTES

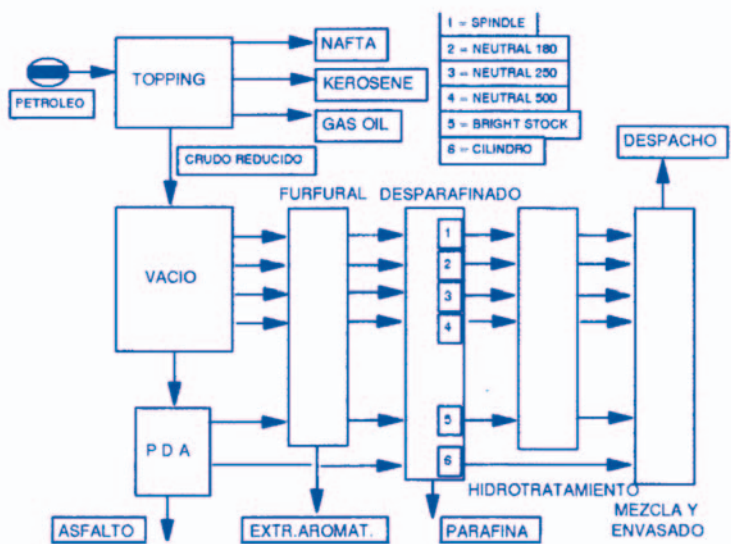
PLANTAS BASICAS

TOPPING
 VACIO LUBRICANTES
 DESASFALTADO CON PROPANO (PDA)

PLANTAS DE REFINACIÓN

EXTRACCION DE AROMATICOS
 DESPARAFINADO
 HIDROTERMINADO

Fig. 42- Complejo de lubricantes



El petróleo es fraccionado a presión atmosférica en un "Topping" y el crudo reducido enviado a una *Unidad de Vacío Lubricantes*, en una operación *conservativa*, sin afectar por craqueo los hidrocarburos originales del crudo. Los *cortes básicos*, nombrados en la Fig. 42, son enviados a *refinar* a las unidades correspondientes. El fondo de la torre de vacío, que ya no puede ser sometido a nueva destilación, pasa a PDA, ("Propane Desasfaltering").

En PDA se producen, *no simultáneamente*, dos cortes básicos, denominados generalmente "BRIGHT STOCK" y CILINDRO, de alta viscosidad. La carga al complejo ya ha sido calentada y destilada dos veces antes de PDA, una a presión atmosférica y otra a vacío, por lo que resulta técnicamente imposible volver a calentar y destilar sin producir descomposición térmica del material por su alto punto de ebullición. PDA es una operación de extracción con solventes donde el solvente es el propano líquido, que separa por distinta solubilidad los materiales asfálticos, resinas e hidrocarburos de alto peso molecular del aceite. En las condiciones del proceso, los aceites se disuelven en el propano y son luego separados destilando el propano (que destila a baja temperatura), mientras que los materiales pesados salen por el fondo de la torre extractora. Los cortes básicos de PDA, sumados a los obtenidos por destilación en la torre de vacío, conforman los componentes de mezcla que en definitiva formaran los lubricantes a fabricar por la refinería, debiendo ser *refinados* para lograr las especificaciones necesarias para conformar la calidad que los modernos mecanismos requieren. La Fig. 42 muestra las operaciones de refinación aplicada a cada corte base, la Tabla 35 da las especificaciones más importantes de los mismos.

TABLA 35 ANALISIS TÍPICOS DE ACEITES BASES

MATERIAL / ANALISIS	METODO ASTM	SPINDLE	NEUTRAL 180 250 500	BRIGHT STOCK	CILINDRO
COLOR	D-1500	1	2/3	5	-
DENSIDAD	D-587	0,88	0,885 0,890	0,906	0,994
VISCOSIDAD SSU/37,8 °C	D-88	90/110	165/200 220/280 480/550	-	-
VISCOSIDAD SSU/98,9 °C	D-88	-	44/46 47/51 61/65	145/160	300/320
INDICE VISC. MINIMO	D-567	95	94 94 92	93	-
PUNTO INFLA °C	D-92	190	205 210 235	280	250
PUNT. ESC. °C	D-97	-10	-10	-10	7
Nº NEUTRAL.	D-974	0,002	0,002/0,003	0,005	0,3
Nº PRECIPIT.	D-91	0	0	0	0,1
C.R. CONRAD.	D-189	0,003	0,004/0,15	0,7	5
CENIZAS	D-482	Nc	nc	nc	0,03
CORROSI. Cu	D-130	1ª	1a	1a	1a
ASF. DURO	IP-6	-	-	-	0,15
EMULSION	D-1401	40-40-0(15)	40-40-0(15)	40-40-0(15)	0,15

Las denominaciones de los cortes bases responden a criterios históricos, "neutral", palabra inglesa, se aplicaba porque los aceites eran tratados con ácido y luego *neutralizados*. Spindle se utilizaba por ser el corte clásico de los aceites para máquinas de cocer y similares. El "Bright Stock", corresponde a un lubricante pesado, obtenido por desasfaltado, donde cargando un producto negro y de aspecto *sucio*, se obtiene un producto *brillante*. El caso de *cilindro*, nació como "cylinder", pero el uso tradujo el término, correspondiendo a un producto mas pesado que el "bright stock" y menos refinado, que se utilizó principalmente para lubricar los cilindros de las máquinas de vapor.

Las denominaciones anteriormente mencionadas resultan de uso universal, si bien diferentes compañías pueden tener sus propios catálogos para ofrecer sus productos. Los aceites minerales bases son fabricados tanto para la propia producción de lubricantes por mezcla, como para su venta como tales a productores sin refinerías.

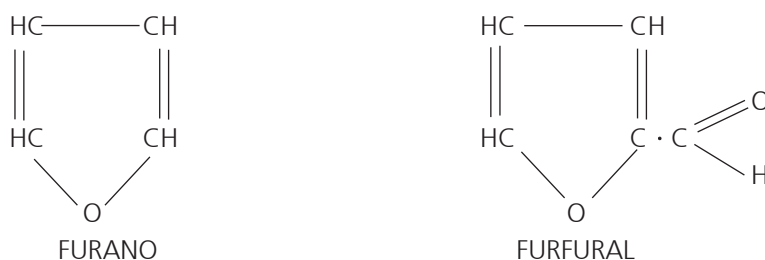
4.1. PLANTAS DE REFINACION DE CORTES BASES

Los cortes base son almacenados en tanques separados, controlados en sus especificaciones y preparados para ser enviados a las plantas de refinación. Los cortes refinados constituyen los mencionados como componentes de mezcla, que tomará la *casa de mezclas*.

4.1.1. FURFURAL

La refinación con furfural, compuesto químico de origen vegetal derivado de las pentosas, tiene por objeto eliminar de los aceites los hidrocarburos aromáticos, formadores de resinas y lacas en los motores. También se logra una disminución de compuestos de azufre y nitrógeno y una mejora en el INDICE DE VISCOSIDAD, que es una de las propiedades más valoradas de los aceites lubricantes.

El furfural comercial es un líquido amarillento, con un contenido de agua de un 0,1 % y trazas de acidez acética. Para su obtención se utilizan materiales como marlo de maíz y cascara de cereales tales como avena, trigo o arroz. El método de obtención es por hidrólisis ácida, por el cual las pentosanas pasan a pentosas, luego a productos intermedios y, por último, a furfural. También se lo conoce como furfurolo o *alfa-furfurilaldehido*, como derivado del *furano*.



El furano tiene carácter "bencénico" en su comportamiento químico, que se lo imparte al furfural, el cual es un solvente selectivo de hidrocarburos aromáticos.

La operación industrial es una extracción líquido - líquido donde el furfural es el solvente selectivo mas utilizado (Fig. 43), si bien puede haber unidades que usan fenol, propano-cresol y Duosol (propano y fenol-cresol). Antiguamente se utilizaba el anhídrido sulfuroso, procedimiento actualmente obsoleto. La operación de extracción con solventes reemplazó al proceso con ácido sulfúrico concentrado, que formaba un barro ácido de muy difícil eliminación por su alto grado de acción contaminante. El extracto aromático que se

obtiene en la unidad de furfural, ha encontrado aplicaciones industriales, como por ejemplo extendedor de caucho, lo que facilita su total eliminación.

El tratamiento con furfural produce un importante aumento del INDICE DE VISCOSIDAD del aceite, que puede llegar a más de 120, no obstante la siguiente etapa de refinación, desparafinado, producirá una disminución que obligará a un control de ambas operaciones en busca del punto óptimo. Esto es debido a que los aromáticos tienen bajo IV y los parafínicos alto.

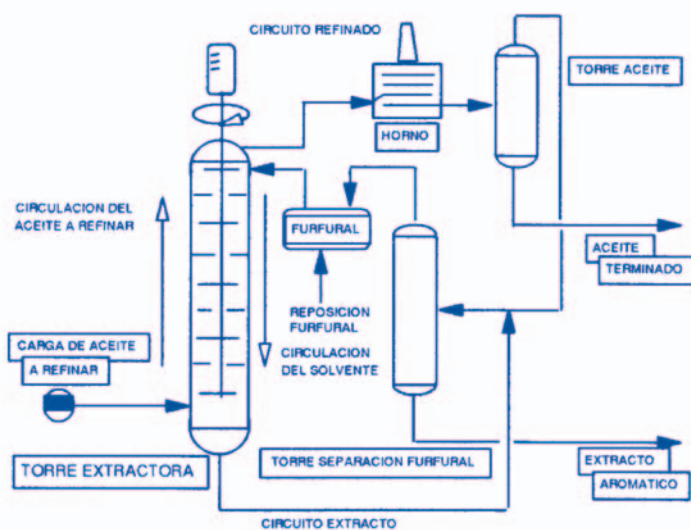
El control del IV en la unidad de Furfural se logra regulando la relación *solvente / carga*, propano / aceite, cuando la relación aumenta, aumenta la extracción de aromáticos y por ende el Índice de Viscosidad del aceite refinado, pero esto causa una disminución del rendimiento de la operación.

4.1.2. DESPARAFINADO, PLANTA MEK

En el rango de destilación de los aceites se encuentran los hidrocarburos parafínicos normales o poco ramificados, que forman la familia de las parafinas de alto punto de congelación. Las denominadas *parafinas*, con puntos de congelación entre 40 y 90 °C tienen, separadas de los aceites o del petróleo, el aspecto del material de las velas de iluminación. Estos compuestos le imparten al aceite alto punto de congelación o escurrimiento, debiendo ser eliminados para lograr las especificaciones que permitan un servicio adecuado en situación climática fría.

Modernamente se realiza la separación por aplicación de solventes selectivos, que permiten cristalizar la parafina y filtrarla por filtros rotativos. El aceite se separa luego por evaporación del solvente, a baja temperatura. Uno de los solventes utilizados es la METIL ETIL CETONA, MEK, en una unidad como la mostrada en la Fig. 44. La intensidad de la desparafinación debe controlarse para no afectar severamente el IV del aceite y el rendimiento de la planta. La parafina es recuperada y tratada para su comercialización, como un producto secundario del proceso.

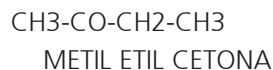
Fig. 43- Planta Furfural



La desparafinación también puede hacerse con propano y urea como solventes y por un hidrocraqueo selectivo de las parafinas, con un catalizador especialmente diseñado que no daña el aceite.

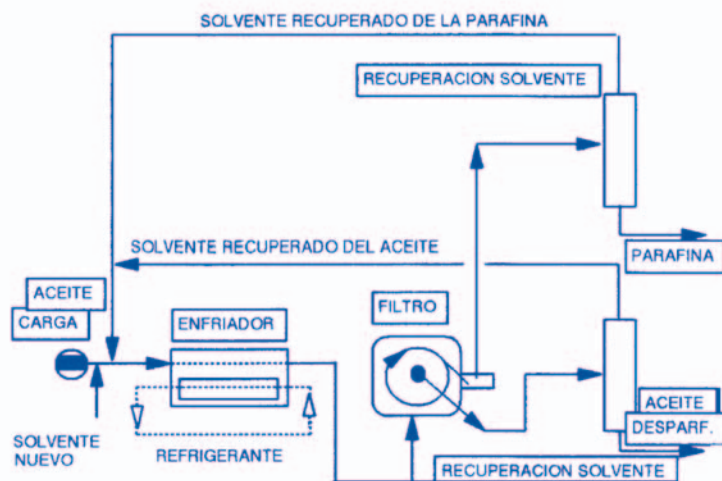
MEK es un tipo selectivo de solvente que solubiliza prácticamente todos los hidrocarburos del aceite, menos las parafinas que son insolubles en la cetona a baja

temperatura. A diferencia de la operación furfural, donde se forman dos fases líquidas, en este caso una es líquida, aceite - MEK, y otra sólida, parafinas cristalizadas. La solubilidad del aceite en el solvente se mejora agregando tolueno, que evita se formen dos fases en la parte líquida, que pueden perjudicar la filtración.



El solvente utilizado depende de la viscosidad del corte que se está tratando, a mayor viscosidad (por ejemplo Neutral 500), mayor cantidad de solvente. Esta regla de operación obedece a la necesidad de regular la viscosidad de la solución a la temperatura de filtración, a los requerimientos del grano de los filtros rotativos, que hace al rendimientos de los mismos. Por otro lado a menor viscosidad se forman cristales de parafina más grandes, que pueden ocluir mayor cantidad de aceite en la torta. El aceite ocluido se lava con el mismo solvente, dificultando esta operación grandes cristales de parafina. La regulación de la relación *solvente / carga*, como se puede observar, es crítica, debiéndose considerar también que un exceso de MEK significa gasto de energía en enfriamiento y destilación del solvente. El grado de desparafinado depende de la temperatura de enfriamiento para la cristalización de las parafinas, esta temperatura estará relacionada con los rangos de puntos de congelación de los hidrocarburos involucrados. Es de suma importancia desparafinar hasta el grado necesario según el punto de escurrimiento del aceite que se está preparando, de acuerdo a especificaciones como las dadas en la Tabla 35. Un simple ensayo como el descrito en la Fig. 41, *Determinación del Punto de Escurrimiento*, permite controlar estas variables para obtener el mejor rendimiento (no cristalizar hidrocarburos útiles) y la mejor calidad (no disminuir en exceso el I.V.).

Fig. 44- Planta MEK



4.1.3. HIDROTERMINADO

El terminado de los cortes bases, que se refiere a conferirles el aspecto final en cuanto a aspecto y color, como mejoras importantes en propiedades tales como estabilidad a la oxidación por saturación de dobles ligaduras, menor acidez, menor porcentaje de carbón residual y eliminación de compuesto de azufre, nitrógeno y oxígeno, se realiza actualmente por *hidrotratamiento*. Estas mejoras antes se lograban por tratamiento ácido y filtración por arcillas de los cortes bases, generando residuos contaminantes de difícil eliminación.

El proceso, en síntesis, consiste en circular el aceite mezclado con hidrógeno por un lecho de catalizador de Cobalto Molibdeno, a unos 320 °C y 50 Kg./cm². La unidad o planta

de tratamiento se muestra esquemáticamente en la Fig. 45. Las variables más significativas del proceso son la temperatura, la presión y la relación *hidrógeno/aceite*. La eliminación de compuestos de azufre, nitrógeno y oxígeno disminuye la aceitosidad del lubricante, por lo cual la intensidad del proceso debe ser controlada de acuerdo a las necesidades técnicas.

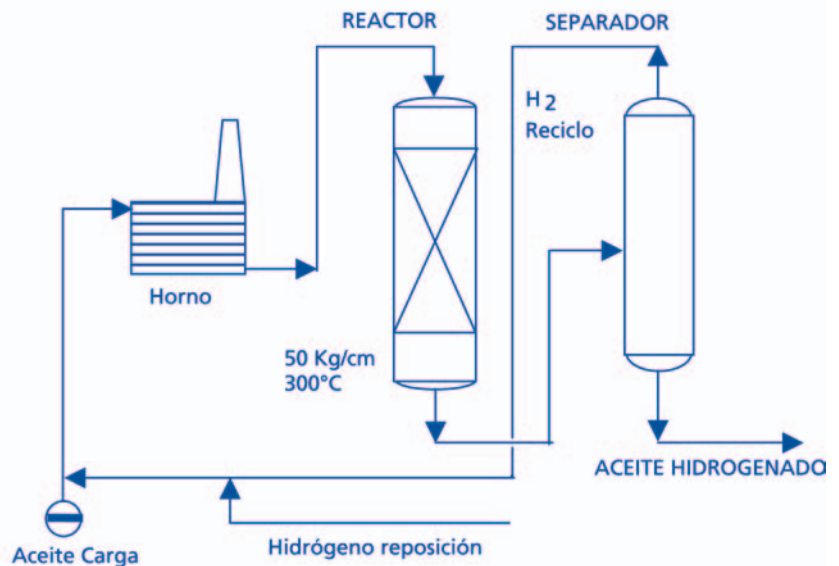
4.1.4. CASA DE MEZCLAS Y ENVASADO

Los cortes bases terminados son almacenados en tanques, de los cuales, por dosificadoras automáticas computarizadas, son tomados los porcentajes necesarios para preparar cada uno de los aceites que la fábrica produce. En línea son agregados los aditivos apropiados y controlada toda la operación por analizadores de viscosidad automáticos. El control final corresponde al Laboratorio de la refinería, que deberá APROBAR cada partida con un análisis completo del producto.

De la casa de mezclas toman los aceites las líneas de envasado, que los colocarán en los envases que correspondan, en operaciones totalmente automáticas, bajo condiciones de seguridad y con controles que aseguren que llegue al cliente el mejor producto surgido del esfuerzo de toda la refinería. En nuestro país se utilizan envases denominados, por ejemplo, 24/1, que significa un paquete de 24 latas o envases plásticos de 1 litro, o 6/4 y baldes de 20 litros. Además se envasan en tambores de 205 litros, despachándose a granel en casos muy especiales.

Las líneas de envasado de 1 litro, automáticas, pueden alcanzar velocidades de más de 300 latas por minuto, en operaciones donde prácticamente no interviene la mano del hombre.

Fig. 45- Planta de hidrogenación



4.1.5. CORTES BASES Y ACEITES TERMINADOS

En el Tomo I de esta obra se habló de la evaluación de los petróleos crudos (Tabla 7, Tomo I), catalogándolos como *parafínicos*, *intermedios* o *nafténicos*. El *factor de caracterización (K)*, vinculado al tipo químico medio de los hidrocarburos de un petróleo o corte, dijimos que variaba desde unos 13,5 para los muy parafínicos, hasta unos 10,5 para los nafténicos. Simplificando y acercándonos a la forma práctica de nomenclatura, un aceite de más de 12 de *K* será parafínico, mientras que uno de menos de 12 en *K*, será nafténico. En la Tabla 7 mencionada se podrán ver las propiedades de un corte, estimadas del *Factor K*.

En la Tabla 35 se especificaron los cortes bases primarios como componentes de mezcla para la preparación de un lubricante. Tomando en consideración el IV requerido, se debe suponer que la refinería pensaba preparar aceites para el automotor. El tipo de petróleo a procesar en ese caso debe ser Intermedio - Parafínico, ubicándose en la zona gris de la clasificación. El Factor K debería ser mayor pero próximo a 11,9 (11,9 ~ 12,3), para cumplir con el IV solicitado, entrando en parafínicos en la clasificación simplificada.

La elección del tipo de petróleo para fabricar los cortes bases depende de los productos a fabricar y los procesos disponibles. Los límites de la clasificación según el Bureau of Mines de EEUU (ver Tomo I), resultan inadecuados por:

Parafínico profundo K»14	Nafténico profundo K»10
Altos puntos de escurrimiento.	Muy bajo IV
Baja aceitosidad	Alto contenido poliaromáticos
Bajo poder disolvente de aditivos	Alta inestabilidad química
Alto contenido de parafinas	Altas pérdidas en tratamientos

Los petróleos parafínicos, con las salvedades mencionadas, resultan aptos para preparar aceites lubricantes para el automotor, en especial los de bajo SAE o W y multigrados que trabajan en amplias gamas de temperatura. Los cortes bases parafínicos permiten obtener menores viscosidades a igual rango en la curva destilación o igual temperatura media de destilación que los nafténicos.

El alto contenido de aromáticos polinucleares o poliaromáticos (PAC, "Polyaromatic Content) de los petróleos nafténicos es objetado para aceites del automotor, por considerar a estos hidrocarburos cancerígenos. La hidrogenación disminuye el contenido de hidrocarburos aromáticos, aconsejándose temperatura superiores a 430°C y presiones superiores a 60 Kg/cm².

Cuando el objetivo es otro que los lubricantes automotor, cuando son más apreciadas las propiedades solventes que aportan los aromáticos y ciclonafténicos superiores, caso de; aceites para trabajo de metales, hidráulicos, transmisión, elaboración de grasas y otros industriales, resultan alternativa válida los petróleos base nafténica. Las cualidades solventes facilitan la incorporación de aditivos y la polaridad de la instauración en los hidrocarburos, las emulsiones con agua.

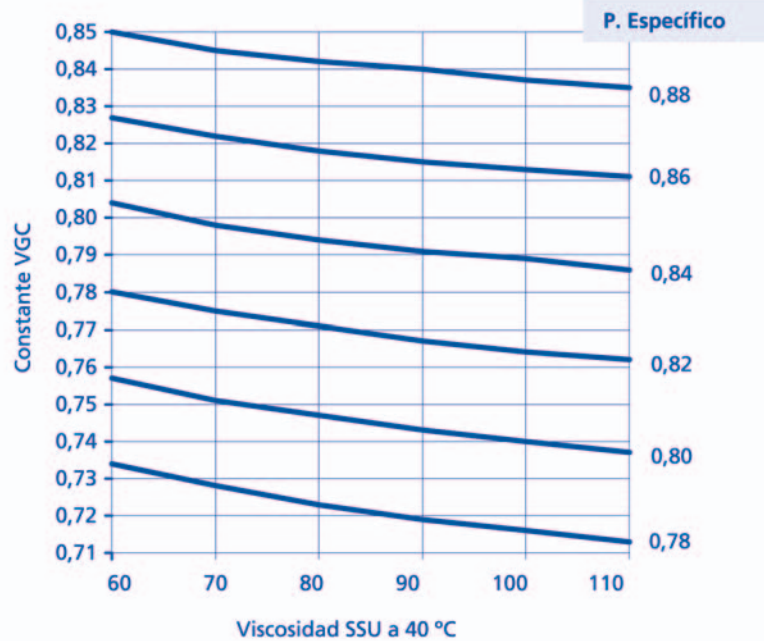
Un índice útil para estimar el carácter solvente de los cortes bases es la constante VGC, constante *viscosidad – peso específico* (VGC, "Viscosity-Gravity Constant", ASTM D 2501 - 95), cuya fórmula es:

$$VGC = (10 \cdot PE_{15/15} - 1,0752 \log(V-38)) / (10 - \log(V - 38)) \quad (4-1)$$

Donde: PE_{15/15}, Peso Espec. 15/15°C
V, Viscosidad SSU a 40°C

Con la fórmula (4-1) se construyó la Fig. 46, para cálculos aproximados.

Fig. 46- Constante Viscosidad –
Peso Específico (VGC)



A mayor constante VGC, mayor poder solvente y, por ende, mayor contenido de aromáticos en el corte de aceite. Cierta carácter solvente colabora a mantener los productos indeseables de la oxidación en el cuerpo del aceite, evitando que se depositen en conductos o recipientes de la máquina. Pero también la instauración propia de los nafténicos induce a inestabilidad química.

Como puede observarse la elección de los petróleos no es tarea simple, faltando mencionar los aspectos económicos, en costo de materia prima y procesos, a considerar para dar con un producto de calidad óptima y competitivo en el mercado consumidor.

5. LAS GRASAS LUBRICANTES

Las denominadas grasas lubricantes, nombre que deriva de realizar una función similar a las grasas animales en las puntas de eje de los antiguos carros de tracción a sangre, constituyen una clase especial de lubricante. A diferencia de los aceites clásicos que hemos visto hasta ahora, son sólidas o semisólidas, compuestas de un agente espesante que se mantiene por una condición físico - química, *disperso* en un aceite lubricante. Como en el caso de los aceites líquidos, el agregado de aditivos específicos puede mejorar algunas propiedades o dar características especiales.

Las primeras grasas eran el producto de mezclar resinas con cal y un aceite mineral, mientras que actualmente la mayoría utiliza como espesante jabones y un aceite mineral como medio dispersante. En el mercado se ofrecen grasas no jabonosas y con aceites no minerales para usos especiales, que conforman con las tradicionales un amplio espectro de lubricantes semifluidos.

En términos generales se puede decir que las grasas cumplen con las funciones lubricantes de un aceite, pero tienen limitaciones fundamentales, como no proveer enfriamiento al mecanismo ni facilitar la limpieza del mismo por circulación. Como ventaja presentan la posibilidad de permanecer en el mecanismos, cuando la configuración del mismo no permite relubricación y el tiempo de funcionamiento debe ser prolongado. Otra ventaja apreciada es la barrera que presenta a la entrada de contaminantes, que se contrapone a su falta de habilidad para limpiar el mecanismo desde adentro. Las partículas metálicas que

podieran desprenderse de los cojinetes, por escamado o gripado de las superficies, en el caso de los aceites este los arrastrara en su fluj y los depositara en el cárter, mientras que la grasa los mantendrá circulando en el mecanismo, aumentando los daños.

Los beneficios que debe esperar un mecanismo de una grasa se pueden resumir en:

- Adecuada lubricación, reducir fricción y desgaste.
- Protección contra la corrosión.
- Sellado de la entrada de contaminantes.
- Permanencia, evitando ser expulsado.
- Resistencia a los cambios de estructura con el uso prolongado.
- Mantener la consistencia adecuada tanto a baja como alta temperatura.
- Compatibilidad con los materiales de sello, elastómeros, etc..
- Tolerar algún grado de contaminación, por ejemplo agua.

5.1. ESTRUCTURA DE LAS GRASAS LUBRICANTES

Los componentes primarios de las grasas son jabones y aceite mineral. Además, como productos de reacciones incompletas, pueden aparecer ácidos grasos, álcalis, agua, etc. y, por adicionarse por alguna razón especial, alcoholes grasos, glicerina, glicóles y fenoles, entre otros.

Los jabones, encargados de dar cuerpo a la grasa, aportan con su catión las más importantes características del producto final y son dispersados en el líquido por medios térmicos. Esta operación es favorecida por el agregado de peptizantes y favorecedores de dispersión o modificadores de temperatura de dispersión. El aceite, casi con exclusividad mineral, corresponde a viscosidades ligeras o medias, con Índices de Viscosidad generalmente menores de 60, provenientes de crudos nafténicos con poco tratamiento. El bajo IV asegura la presencia de hidrocarburos aromáticos y, una refinación limitada, de compuestos de azufre, nitrógeno y oxígeno no extraídos en furfural ni hidrogenados, que aumentan la polaridad del total y favorecen tanto la solubilidad como la gelificación del sistema.

Una vez que el jabón se ha dispersado en el aceite y parcialmente disuelto por alta temperatura, se procede a su cristalización controlada para darle la estructura deseada.

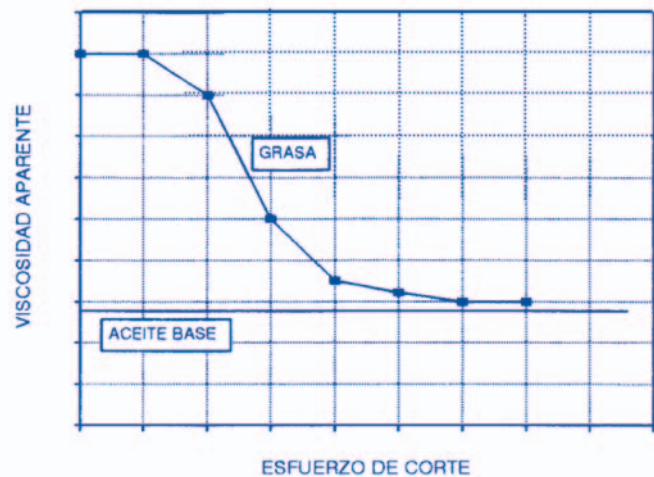
Una grasa técnicamente es un sistema coloidal, intermedio entre una solución verdadera y una suspensión de partículas. En la solución las partículas son monomoleculares (o iones), mientras que en la suspensión pueden ser visibles a simple vista o al microscopio. En el estado coloidal las partículas no son moleculares pero no son visibles al microscopio o están en el límite de visibilidad del mismo. Las partículas coloidales se pueden tomar entre 0,2 micrones máximo y 0,005 micrones como límite inferior, que coincide, este último, con el diámetro de las grandes moléculas de alto peso molecular. Las soluciones de grandes moléculas tienen comportamiento y propiedades coloidales, aunque sean monomoleculares.

Las propiedades de los coloides están relacionadas con las superficies que se ponen en juego, considerando que a diferencia de las soluciones que presentan una sola fase, aquellas presentan dos, un sólido como *fase dispersa* y un líquido como *medio dispersante*. A modo de ejemplo podemos decir que un cubo, de 1 cm³, aumentará más de un millón de veces su superficie si se lo fracciona al tamaño de partículas coloidales.

Cuando el medio dispersante es un líquido, aceite en el caso de las grasas, al coloide se lo llama *sol*, presentando los *soles* de jabones de alto peso molecular dispersos en hidrocarburos con características polares, propiedades distintivas. En primer lugar parte del jabón se disuelve en el aceite, pero esa solución tiene características coloidales por ser jabones de alto peso molecular. Un *sol liófilo* (afición por el líquido) es más estable que uno *liófilo*, acentuándose esta propiedad cuando ambas fases son polares. Si bien el aceite es solo en parte polar, es suficiente para dar estabilidad al sol.

El jabón precipitado por la temperatura de trabajo se peptiza, desintegrándolo en partículas de dimensiones coloidales por medios físicos y el agregado de peptizantes. En la superficie de separación de fases se manifiestan los fenómenos que las grandes superficies ostentan, como adsorción, absorción y efectos polares, todos estabilizantes. La presencia de sustancias alcalinas, sobrantes de la saponificación del ácido graso para elaborar el jabón, es peptizante y estabilizante en pequeñas proporciones, más considerando que tiene el mismo catión que el jabón. No obstante la concentración no debe ser alta por ser los electrolitos coagulantes de soles.

Fig. 47- Variación de la viscosidad aparente de una grasa con el esfuerzo (cualitativa)



En el caso de los soles las partículas coloidales se comportan en forma independiente entre sí. Cuando las partículas dispersas están ligadas según una estructura en forma de red, nos encontramos con un *gel*, sistema este último de mayor viscosidad o más *espeso*, que el *sol* equivalente. Técnicamente un gel es un sol coagulado, donde el coagulo no se ha separado sino que incluyó toda la fase líquida del sol. Como resultado del paso a gel se forma una masa semirrigida gelatinosa, que en el caso de la grasa es no elástica (un gel elástico típico es la gelatina). El paso de sol a gel no es total e inmediato, como es el caso de muchos geles hidrófilos (medio agua), pudiendo en el caso de las grasas coexistir ambas clases.

Tanto la red del gel como las partículas coloidales del sol, tienen características fibrosas, dependiendo de la relación longitud a diámetro (L/D) de las fibras, la resistencia mecánica de la grasa. A mayor relación mejor comportamiento frente al esfuerzo de corte al que es sometida en una aplicación, pero como contrapartida, a mayor L/D mayor inestabilidad por menor retención del aceite.

Los jabones para la fabricación de grasas están limitados a los cationes Ca, Na, Li, Mg Sr, Al, Ba y otros tales como Zn o Pb en menor proporción, por ser los que dan la estructura deseada al dispersarse en el aceite. En la que respecta al ácido graso a saponificar, se ha comprobado que debe tener una cadena carbonada de entre 16 y 18 átomos de carbono. Una mayor cadena hace al jabón muy soluble, impidiendo una buena cristalización, en cambio menos carbonos en el ácido, hacen un jabón poco soluble para gelificar adecuadamente.

Los agregados para modificar estructuras pueden ser alcoholes derivados de la lanolina, glicerina, glicoles, fenoles y otros. En general cada productor tiene su fórmula y su procedimiento de elaboración, que depende del equipamiento y las materias primas empleadas. Además la fabricación de grasas tiene un componente artesanal que aún hoy, tiempo de grandes progresos tecnológicos, en algunos casos se mantiene.

5.2.- CLASIFICACION, PROPIEDADES Y ENSAYOS DE GRASAS

Las grasas son lubricantes no Newtonianos, entran en la clasificación de plásticos de la Fig. 6, que necesitan una mínima fuerza para iniciar el flujo. Al aumentar el esfuerzo de corte la grasa mantiene la viscosidad hasta un límite, luego del cual esta disminuye tendiendo a la viscosidad del aceite base, como puede observarse en la Fig. 47, este comportamiento es reversible. Las viscosidades de las grasas son aparentes, midiendo la presión necesaria para que una cantidad fija de grasa pase por unos tubos capilares, a una temperatura definida (ASTM D 1092-93). En realidad utiliza la ley de Newton, igualando la viscosidad al cociente entre la tensión y el gradiente de corte, dejando como única variable la presión. La viscosidad de la grasa es siempre mayor que la del aceite base que la forma y sigue la misma ley de cambio con la temperatura que el aceite (Fig. 48).

TABLA 36 ANALISIS TIPICOS DE GRASAS

PRODUCTO ENSAYO	UNIDAD ASTM	NORMA	ANALISIS TIPICO			
			5	2	3	2
GRADO NLGI	-	-	5	2	3	2
CATION			CALCIO	SODIO	LITIO	LITIO
PENETRACIÓN A 25 °C	0,1 mm	D-217	145	287	245	-
PENET., 60 GOLPES A 25°C			-	-	-	275
PENET. 100000 GOLPES " "	0,1 mm	D-217	-	-	-	25
PUNTO DE GOTEO	°C	D-566	98	180	180	180
SHELL 4 BOLAS	Kg	D-2596	-	-	250	
ESTABILID. OXIDAC. 100 h	lb	D-942	-	10	10	10
USOS			(1)	(2)	(3)	(4)

(1) Grasa insoluble en agua, para cojinetes y empaquetaduras bombas de agua. Acción sellante. Con grafito en polvo, es apta para mecanismos con dificultades para el engrase.

(2) Grasa de textura suave, para rodamientos de trabajo severo y altas temperaturas. ambientes secos. Apta para rodamientos de ruedas y crucetas de árboles de transmisión.

(3) Grasa multipropósito, aplicable entre -15 y 120 °C. Resistente a la humedad. Con aditivos EP, para grandes cargas. Apta para chasis, punta de ejes, crucetas, niples, cojinetes lisos, rodamientos, cadenas engranajes, etc.

(4) Grasa textura suave, fibra corta, resistente al agua inhibida contra oxidación. Rango de temperatura -20 a 120 °C. Aplicable con pistola grasera. Apta para rodamientos de motores eléctricos. Puntas de ejes de maquinas pesadas. Para trabajo prolongado sin recambios o reengrase.

En la Tabla 36 se muestran análisis típicos de grasas, dando ejemplos de las tres más importantes en la actualidad, las sódicas, cálcicas y de litio.

5.2.1. CLASIFICACION DE GRASAS, GRADO NLGI

Una de las clasificaciones de uso internacional más generalizada y utilizada en nuestro país, corresponde a la NLGI, "National Lubricating Grease Institute", que utiliza como comparación la *consistencia*. Cuando hablamos de aceites lubricantes vimos la clasificación SAE, que solo especificaba viscosidad para los mismos, sin dar ninguna pista sobre la calidad. En el caso de las grasas los grados NLGI tienen el mismo significado, solo nos indican una

consistencia, expresada por un ensayo de *penetración*. Los Grados NLGI de la Tabla 37, se completan con una medida subjetiva, denominada Grado de Dureza, que pretende aclarar la consistencia práctica de cada número.

La consistencia, expresada por la penetración en la NLGI, es una medida de la dureza relativa de las grasas, y es una función de los componentes primarios, jabón y aceite, de los aditivos y de los procedimientos de elaboración, en especial el L/D logrado. En general las grasas para automotores están entre los números *NLGI 1,2,y 3*. Las grasas de sistemas centralizados de lubricación tienen un máximo en los alrededores de 0, pudiendo llegar a 2 con cañerías cortas y de diámetro adecuado, a los efectos de no aumentar excesivamente la presión de las bombas de engrase. A bajas temperaturas las grasas pueden lubricar mal, produciendo, sobre todo en los rodamientos, que estos no giren y se produzca deslizamiento con desgaste.

Fig. 48- Variación de la viscosidad con la temperatura de una grasa y su aceite de constitución

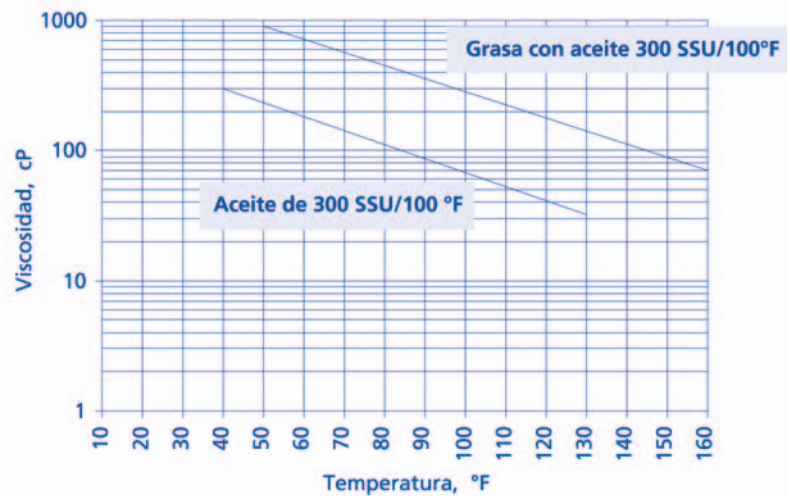


TABLA 37 CLASIFICACION NLGI PARA GRASAS

GRADO NLGI	PENETRACION ASTM D-217 25 °C, 0,1 mm	GRADO DE DUREZA	USOS MAS COMUNES
000	445-475	MUY FLUIDA	ENGRANAJES, BAJAS TEMPERAT.
00	400-430	FLUIDA	ENGRANAJES, BAJAS TEMPERAT.
0	355-385	SEMI FLUIDA	COJINETES. SISTEMAS CENTRALES, BAJAS TEMPER.
1	310-340	MUY BLANDA	IDEM
2	265-295	BLANDA	COJINETES, RODAMIENTOS
3	220-250	MEDIA	COJINETES, RODAMIENTOS
4	175-205	DURA	COJINETES LISOS GRASA EN BRIQUETAS
5	130-160	MUY DURA	IDEM
6	85-115	DURISIMA	IDEM

Completando la clasificación NLGI ("Consistency Number"), ASTM ha desarrollado en el Método D 4950-95, "Standard Classification and Specification for Automotive Service Greases", una serie de requerimientos para las propiedades y el desempeño de las grasas automotor. La Tabla 38 muestra la tipificación ASTM mencionada, donde se incluyen los tipos:

LA, típica para chasis y juntas universales, en vehículos de frecuente lubricación y servicio suave.

LB, típica para chasis y juntas universales, en vehículos de largos períodos sin lubricación y servicio severo.

GA, Típica para rodamientos de ruedas en servicio suave.

GB, Típica para rodamientos de ruedas en servicio moderado, como la mayoría en circulación.

GC, Típica para rodamientos de ruedas en servicio severo, como los taxis, ambulancias, policías, ómnibus.

TABLA 38 GUIA DE REQUERIMIENTOS ASTM PARA LAS CATEGORÍAS DE GRASAS

ENSAYO	DESCRIPCION	LA	LB	GA	GB	GC
D 217	Penetración	x	X	x	X	x
D 566	Punto de goteo	x	X	x	X	x
D 1264	Resistencia al agua	-	-	-	X	x
D 1742	Separación del aceite	-	X	-	X	x
D 1743	Protección contra la herrumbre	-	X	-	X	x
D 2266	Ensayo cuatro bolas	x	X	-	X	x
D 2596	Cuatro bolas EP	-	X	-	-	x
D 3527	Vida a alta temperatura	-	-	-	X	x
D 4170	Desgaste por el uso	-	X	-	-	-
D 4289	Compatibilidad con elastómeros	x	X	-	X	x
D 4290	Escape de aceite/grasa ("leakege")	-	-	-	X	x
D 4693	Torque a baja temperatura	-	X	x	X	x

Las grasas pueden ser catalogadas como *multipropósito*, cuando cubren más de una categoría, designándolas en tal caso, por ejemplo, como *LB – GC*.

Los símbolos para ser colocados en los envases, anunciando la clasificación NLGI y la tipificación ASTM D 4950-95, son provistos por la NLGI, previa aprobación del producto.

Es común ver en envases de grasas otras clasificaciones como:

Grasa (LT) - Baja temperatura, cuando la temperatura de funcionamiento como la ambiente son inferiores a 0 °C.

Grasa (MT) - Media temperatura, de -30 a 120 °C. Con una media menor de 80 °C, con picos de mayor temperatura.

Grasa (HT) - Alta temperatura, funcionamiento permanente a más de 80 °C, con picos de 140 °C. Cuando trabajando a 75-80 °C, el reengrase no es frecuente.

Grasa (EM) - Contiene bisulfuro de molibdeno. Alternativa de las grafitadas, se usa cuando por el servicio se produce deslizamiento.

Grasa (EP) - Extrema presión, contienen compuestos de fósforo, azufre y/o cloro, funcionamiento a más de 110 °C. Deben ser usadas con precaución sobre rodamientos, por el ataque a los metales. Se aconseja consulta al proveedor.

5.2.2. PENETRACION, ASTM D-217-97

Se conoce como penetración a las décimas de milímetro que se introduce un cono en una grasa, a 25 °C, bajo un peso determinado, en un tiempo estipulado. Tratándose de un método ASTM, todas las variables y constantes del sistema se encuentran especificadas, con tolerancias que harán que los resultados tengan la repetibilidad (un mismo operador, un mismo aparato) y la reproducibilidad (distinto operador, distinto aparato), exigida por el método.

La penetración es una medida de la consistencia de una grasa, utilizándose para la clasificación de la NLGI.

El aparato utilizado en el método ASTM D-217, se esquematiza en la Fig. 49, donde se ha agregado el aparato para penetración trabajada, con el cual se somete a la grasa a un "trabajo" previo al ensayo, con el objeto de medir el cambio de consistencia con el uso.

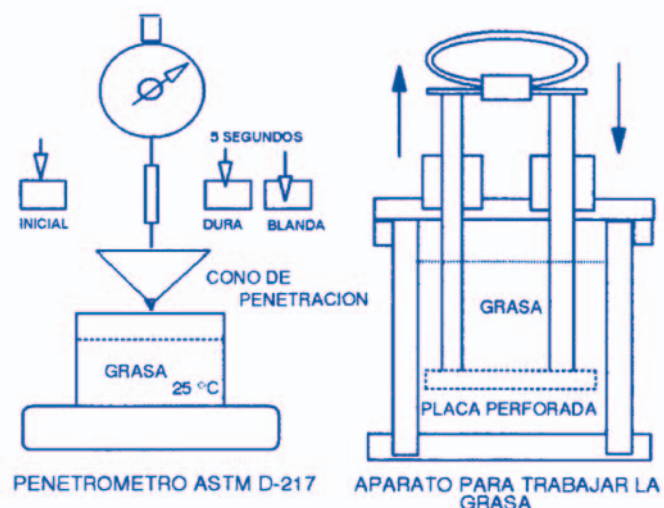
El equipo para trabajar la grasa consiste en un cilindro con un pistón perforado, con el cual se aplican golpes de arriba hacia abajo, retornando a la posición original, haciendo pasar la grasa por las perforaciones y sometiéndola a batido y presiones, simulando el trabajo severo. Se han normalizado dos penetraciones trabajadas para las grasas, una indica 60 golpes (P60) en el equipo y el otro más de 60 golpes. El trabajo prolongado puede llegar hasta los 100000 golpes (P100000). El ensayo a 60 golpes se utiliza para grasas que serán sometidas a servicio medio a severo, pero con facilidades para el recambio o reengrase en tiempos normales. El P100000 se recomienda cuando el servicio es severo y la grasa debe permanecer en uso mucho tiempo por alguna dificultad en el engrase.

La penetración trabajada es una medida de la resistencia de la grasa a la pérdida de consistencia, o de la estabilidad, signos de rotura de la estructura, frente al trabajo mecánico.

5.2.3. PUNTO DE GOTEO, ASTM D-566-97

El Punto de Goteo de una grasa es la temperatura a la cual pasa, desde un estado de plástico semisólido, a líquido fluido, que le permite *fluir* por el orificio del método en las condiciones especificadas por el mismo. En la Fig. 50, se muestra un esquema del aparato de punto de goteo, la grasa se coloca en la copa perforada de la parte inferior del termómetro, calentando hasta que por el orificio cae la *primera gota* de grasa líquida. La temperatura de ese momento se toma como punto de goteo.

Fig. 49- Ensayos de Penetración de grasas



La temperatura del punto de goteo no debe ser tomada como la máxima temperatura de trabajo permanente de la grasa, la cual estará siempre unos 30 ó 40 grados por debajo. Si indicará que a esa temperatura se pueden esperar dificultades, como una irreversible pérdida de su carácter plástico. Las condiciones del mecanismo son distintas del método, influyendo en la temperatura a la que ocurren los fenómenos la duración de la exposición, la evaporación y el diseño mismo del mecanismo.

5.2.4. ESTABILIDAD A LA OXIDACION, ASTM D 942

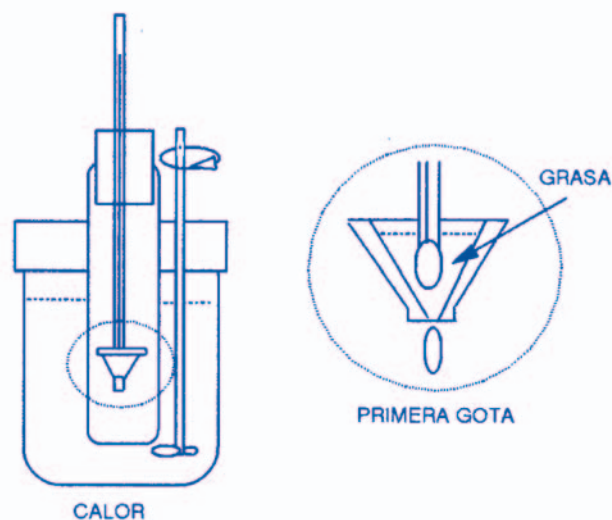
Mide el deterioro de las grasas en condiciones de exposición a atmósfera de oxígeno a 100 psi de presión y a 98 °C de temperatura en forma estática. Intenta una aproximación al almacenaje o al servicio en atmósfera de aire y temperatura. El índice del ensayo es la pérdida de presión de la bomba de la Fig. 51, a las 100 horas de ensayo, cuya interpretación se puede resumir:

Pérdida de 0 a 5 libras	-- Excelente
" " 5 " 10 "	-- Buena
" " 10 " 15 "	-- Regular
" " más 15 "	-- mala

La oxidación de la grasa produce, por deterioro del aceite, lacas y gomas sobre los mecanismos, mientras que el jabón al oxidarse se ablanda y la grasa puede perder su consistencia e, inclusive, las propiedades que resultan de su estructura, que se puede romper.

La caída de presión en las grasas no inhibidas resulta lenta, hasta llegar al valor que corresponda a las 100 horas del ensayo. En cambio cuando se ha agregado un inhibidor de corrosión, la presión se mantiene aproximadamente constante hasta un determinado tiempo, para luego caer bruscamente, pasando generalmente las 100 horas de ensayo. Al tiempo de presión constante, se lo denomina período de inducción y corresponde al tiempo que el inhibidor tarda en consumirse, cortando las cadenas de radicales libres y peróxidos de las reacciones de oxidación. Si el inhibidor se consumiera antes de la 100 horas, de todas formas la caída de presión sería menor que si no se hubiera agregado, por quedarle menos tiempo a la grasa para oxidarse. La presión generalmente es tomada con registradores a carta, de forma de registrar todo el ensayo y tomar las caídas de presión y los tiempos en que se producen. Como se observa en la Fig. 51, la grasa se coloca en cinco bandejas a los efectos de ofrecer más superficie para la oxidación.

Fig. 50- Equipo para Punto de Goteo ASTM D 566-97



5.2.5. PROPIEDADES ANTICORROSIVAS, ASTM D-1743-94

La superficie de los cojinetes resulta ser muy sensible a la corrosión, debido en gran parte a que los desplazamientos que con el uso ocurren ejercen un efecto de pulido que las mantiene expuestas, sin su propio óxido. El medio en el que funciona el mecanismo puede estar contaminado con gases o vapores corrosivos y agua en forma de vapor o líquida. La propia grasa, salvo que tenga algún aditivo EP incompatible con sellos o metales, suele ser protectora de las superficies, debiendo interponer además como barrera contra la entrada de contaminantes exteriores. El uso prolongado, la presión constante de los contaminantes presentes en el entorno de trabajo, los cambios de temperatura y las paradas - puestas en marcha o cambios de velocidad, hacen que las grasas puedan incorporar sustancias nocivas para los metales de los cojinetes.

La corrosión se manifiesta por daños a las superficies, como "pitting", marcado, herrumbre, etc., en un fenómeno progresivo que termina por destruir el cojinete. Los productos del ataque inicial, como la herrumbre, pueden ejercer en algunos casos una acción lubricante.

El método ASTM D-1743 evalúa los daños a la superficie de cojinetes nuevos, sometidos a la acción de la grasa en prueba, bajo las condiciones del ensayo. Las propiedades anticorrosivas de la grasa se puntúan subjetivamente, luego del ensayo sobre la superficie previamente acondicionada según el método, con el siguiente criterio:

Corrosión 1.- Sin ataque visible a simple vista.

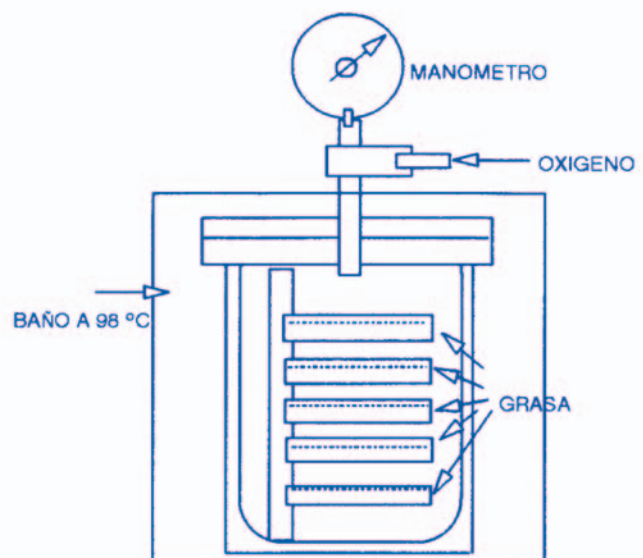
Corrosión 2.- 2 ó 3 puntos de ataque apenas visibles a simple vista.

Corrosión 3 - Mayor cantidad de puntos o más grandes.

El ensayo se realiza haciendo funcionar el cojinete con la grasa, girando bajo ligera carga durante 60 segundos a 1750 rpm, a los efectos de distribuir la grasa en forma similar al trabajo normal. A continuación se lo enjuaga con aguas para luego guardarlo por un tiempo bajo condiciones de temperatura y humedad controlada. Los ensayos de almacenaje se pueden realizar a 25 °C por 14 días y 100 % de humedad relativa, o a 52 °C por 48 horas con 100 % de humedad relativa, debiéndose informar las condiciones con el resultado.

El ensayo no mide la corrosión durante el uso de la grasa, sino que considera la acción preventiva de la corrosión sobre un rodamiento, luego de un uso limitado solo para distribuir la grasa, durante el almacenamiento en ambiente de humedad.

Fig. 51- Estabilidad a la oxidación, ASTM D-942



5.2.6. PROTECCION CONTRA DESGASTE, ASTM D 2266 – 96, (CUATRO BOLAS)

Los ensayos de protección contra el desgaste y la fricción son necesarios cuando las grasas serán sometidas a trabajo severo con relación a la carga, a la velocidad o a las posibilidades de choque con el correspondiente deslizamiento. Por lo general se requieren estos métodos de análisis en grasas para rodamientos del tipo rodillos. El ASTM D 2266 cubre las características preventivas del desgaste en el deslizamiento de superficies acero – acero, excluyendo las superficies de otros metales. Las propiedades EP tampoco son evaluadas por el ensayo. Si bien existen varios métodos con objetivo similares, en los últimos tiempos se está aceptando con más regularidad el de las cuatro bolas, por lo cual se lo va a describir con algo más de detalles a continuación.

El ASTM D-2266 sumariamente hace rotar una bola de acero sobre tres estacionarias del mismo material, en una disposición similar al ASTM 2783 (Tabla 22), midiéndose el diámetro de las marcas de desgaste, o huellas ("wear scars"), sobre la estacionaria, como fin del ensayo. El ASTM D 2783 es más exigente que el D 2266 no teniendo ninguna equivalencia, recomendando el ASTM no confundirlos.

Las condiciones del ensayo son las siguientes:

Temperatura	75°C
Velocidad	1200 rpm
Carga	40 Kg
Duración	60 min.

La medición del diámetro de la marca de desgaste se hace en un microscopio, al 0,001 de mm, reportando la media aritmética de seis lecturas.

Entre otras propiedades de las grasas que pueden considerarse, muchas vinculadas a las estructura de las mismas, podemos mencionar la *textura*, que es una sensación al tacto, que hace a una grasa *suave* (fibras menores de 2 micrones), o *fibrosas*, con tamaños mayores de fibras que al tacto se presentan como más groseras (pueden superar los 50 micrones). El tacto también distingue características tales como pegajosas o mantecosas. La textura está en relación a la adhesividad de las grasas y a su facilidad de manejo.

La *estabilidad estructural* es la que le permite a la grasa mantener su consistencia y textura durante su vida útil. La temperatura, el tiempo de uso, el trabajo mecánico, alguna contaminación, tratarán que los cambios transitorios que puedan ocurrir se hagan irreversibles, alterándola en forma permanente. Cuando una influencia transitoria se retira, la grasa debe retomar en tiempos finitos su estado original, si bien no siempre vuelve exactamente al mismo valor, como se muestra en la Fig. 52, en una propiedad denominada *tixotropía*, de igual concepto que la histéresis. Este fenómeno esta vinculado a la pérdida de penetración luego de ser la grasa trabajada.

Mientras la estabilidad estructural de una grasa no sea superada, por una severidad de servicio mayor que aquella que la hizo recomendable, los cambios serán "casi" reversibles y en todo caso previsibles, si se conocen las condiciones de tixotropía de la grasa y la variación de la viscosidad aparente con la temperatura. El conocimiento de estas propiedades es importante para predecir la caída de presión en sistemas de distribución automática de grasa, bajo condiciones de flujos y temperaturas conocidas.

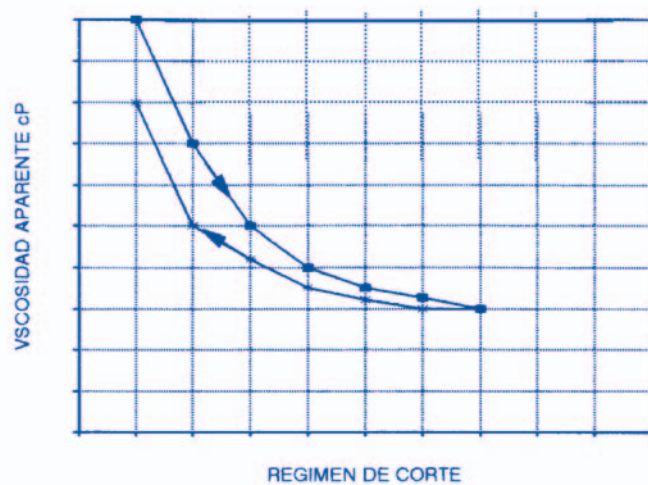
La *estabilidad térmica*, variación de la viscosidad aparente con la temperatura, depende del catión del jabón, dado que a la disminución de la viscosidad del aceite y al ablandamiento del jabón, se contraponen el hinchamiento de las fibras que tiende a compensar los demás efectos. El catión también influye sobre la tixotropía, tal como se muestra en la Fig. 53, que muestra cualitativamente ambas propiedades.

5.3. TIPOS DE GRASAS

El fluido lubricante de la grasa es, generalmente, un aceite mineral, que puede ser desde un "spindle" hasta un cilindro. La materia espesante, los jabones, pueden provenir de materiales vegetales o animales, como ácidos grasos o glicéridos, o grasas hidrogenadas, como de aceites de pescado. El peso molecular del material graso es importante para determinar la solubilidad en el medio aceite, como lo es el grado de insaturación, que dará al producto final características de inestabilidad.

La saponificación de los ácidos grasos se realiza con álcalis de diferentes cationes, siendo los más importantes los hidróxidos de sodio, calcio, magnesio, litio, etc. Además se agregan aditivos para modificar, incrementar o adicionar propiedades especiales a las grasas terminadas.

Fig. 52- Tixotropía de grasas



5.3.1. GRASAS CALCICAS

La textura de las grasas cálcicas normales corresponde a *suaves*, de tipo vaselina, el punto de goteo está entre los 90 - 100 °C, lo que aconseja su uso a no más de 60 °C, con un máximo no permanente de 80 °C. Contienen agua de cristalización, entre 0,5 a 1 %, o sea que el agua entra en la composición de la grasa, produciendo daños en su estructura la pérdida de la misma. La elevación de temperatura evapora el agua, por lo que representa una severa limitación, como así mismo las elevadas revoluciones, que pueden separar el agua por efecto de centrifugado.

La propiedad de contener agua en su composición la hace apta para ambientes húmedos, porque asimila el agua incorporándola, no desintegrándose en ella. Presentan buenas propiedades tixotrópicas y son térmicamente estables; *a las temperaturas recomendadas*.

Las grasas cálcicas se recomiendan para el chasis de los automotores, mientras que en el campo industrial son aptas para trabajar en instalaciones expuestas al agua, con temperaturas de no más de 60 °C, como la sección de tela de las maquinas papeleras. También proporcionan protección contra el agua salina, usándose en ambientes marinos.

5.3.2. GRASAS SODICAS

Las grasas sódicas, también conocidas como de sosa, tienen una estructura fibrosa, mayor adherencia y punto de goteo que las cálcicas (punto goteo 150 °C), lo que les permite

actuar a mayor temperatura, 120 °C, presentando una buena obturación a la entrada de contaminantes. El agua las disgrega, siendo una forma de reconocerlas trabajarlas entre los dedos con un poco de agua, notando la formación de un fluido lechoso a medida que el agua se incorpora.

Las grasas sódicas se utilizan en mecanismos donde las condiciones de trabajo sean opuestas a las aptas para las cálcicas. Resisten altas temperaturas y presiones, con muy buena tixotropía. En el automotor se las utiliza en cojinetes de punta de eje, teniendo una duración de moderada a larga de servicio. Tienen una severa limitación con respecto a la humedad en el ambiente de trabajo.

5.3.3. GRASAS DE LITIO

Las grasas de litio comenzaron a utilizarse durante la segunda Guerra Mundial, por sus características universales se las denomina multipropósito, resultando aptas en el automotor para chasis, punta de eje, bomba de agua y prácticamente todos los movimientos. Presentan generalmente textura suave, aunque según el método de obtención pueden ser ligeramente fibrosas. Buena adherencia a las superficies metálicas, con un punto de goteos de los más altos, 190 - 205 °C y una muy buena resistencia mecánica y al agua, como propiedades reológicas óptimas.

Los ácidos grasos que dan mejores características son el esteárico ($C_{17}H_{35}COOH$) y el aceite de ricino hidrogenado, este último el más usado en la actualidad. El aceite empleado tiene una viscosidad entre 200 y 800 SSU a 40 °C, prefiriéndose los nafténicos por presentar mejor dispersión.

Las grasas de litio suman casi todas las características positivas de las de calcio y sodio, sin compartir sus desventajas, son estables a altas temperaturas, se usan en aplicaciones húmedas, presentan un buen sello a las contaminaciones externas. Son recomendables para aquellas aplicaciones donde las temperaturas son muy altas para las de calcio. Los fabricantes de rodamientos por lo general recomiendan para sus mecanismos grasas de litio.

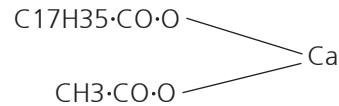
5.3.4. GRASAS DE ALUMINIO

Las grasas de aluminio tienen un aspecto y consistencia que las presentan como muy atractivas a la vista y al tacto, no obstante su estabilidad mecánica es baja, con un punto de goteo de 90 °C. Como se muestra cualitativamente en la Fig. 53, la viscosidad aumenta al aumentar la temperatura, en un comportamiento que depende de la estructura lograda en la fabricación. El efecto físico observable es un aumento de la gomosidad de la grasa con la temperatura, por hinchamiento de las fibras de estructura. Cuando se las utiliza para aprovechar sus características reológicas particulares, por lo general se las fabrica con aceites de alta viscosidad y se las suplementa con aditivos que mejoren sus propiedades.

Como las grasas de aluminio son resistentes al agua y aptas solo para bajas temperaturas (menos de 60 °C), se las recomienda para chasis en automotores y para engranajes en la industria. Por lo general se les agrega algún polímero como aditivo mejorador.

5.3.5. GRASAS COMPLEJAS

Se denominan grasas complejas a las formadas con un jabón de dos ácidos diferentes, unidos a un mismo catión polivalente. Por ejemplo una grasa compleja de calcio tendría un jabón como el siguiente:



Las grasas complejas se distinguen de las comunes, fundamentalmente, en su punto de goteo, que en el caso de la compleja de calcio puede llegar a 260 - 290 °C. La estabilidad mecánica es moderada, manteniendo una buena consistencia con la temperatura, que es recomendada en unos 200 - 220 °C máximo. Presenta una buena estabilidad frente al agua y propiedades EP sin aditivos.

Se preparan grasas complejas de litio que pueden llegar a los 300 °C de punto de goteo y de aluminio, con benzoatos como aniones complementarios, que le mejoran las propiedades para aplicaciones especiales.

La limitación más importante de las grasas complejas es una propiedad denominada *reopectia*, término que caracteriza la tendencia del *gel* a endurecer con el tiempo, lo cual causa que no pueda ser utilizada en mecanismos con poca renovación de grasa o que utilicen bombas de lubricación, por disminuir la bombeabilidad con el tiempo.

A las mencionadas podemos agregar las grasas de jabón mixto, preparadas con dos cationes y un mismo ácido graso, como las Ca - Na. Las propiedades suelen ser intermedias, con predominio de aquellas del catión en mayor proporción, resultando en algunos casos mejoras en la estructura de la grasa final.

El agregado de aditivos lleva a preparar las grasas especiales, fabricadas para cumplir una determinada función. Como ejemplos podemos mencionar:

Grasa cálcica con Cinc en polvo: Resistente al agua, para roscas de cañerías.

Grasa de litio con S₂Mo: Rodamientos sobrecargados o de terminación deficiente.

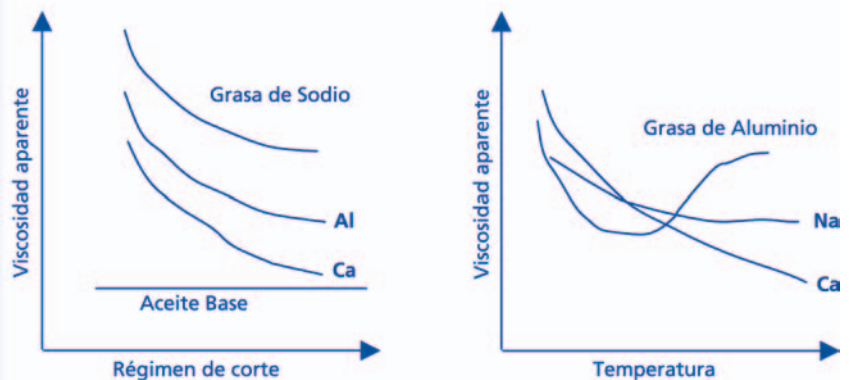
Grasa con bentonita: EP, para ácidos o álcalis, alta temperatura y carga.

Grasa con amianto: Empaquetaduras de válvulas de hidrocarburos.

Grasas asfálticas: Engranajes abiertos

Grasas grafitadas: EP, engranajes abiertos, presencia de hidrocarburos.

Fig. 53- Propiedades de estructura de grasas, Viscosidad aparente en función de Régimen de Corte y de Temperatura



La propiedad más importante de las grasas es su facilidad de aplicación, como la simplicidad de relubricación y uso. Si bien los aceites suman la propiedad de dispersar el calor y lubricar por circulación que limpia más las superficies, necesitan complicados mecanismos estancos para funcionar. La grasa se mantiene sola adherida al mecanismo que lubrica, evitando que entren sustancias extrañas contaminantes.

La experiencia indica que las grasas no son recomendables cuando se pasa el *limite de r.p.m. por diámetro interior del rodamiento (mm)*, denominado *Factor de Velocidad*, de 300000. La temperatura permanente de trabajo aconsejada es de unos 100 °C, con picos de no mas de 150 °C, salvo que se trate de grasas especiales con relubricación adecuada.

Otro conjunto de grasas para aplicaciones especiales lo constituyen las *grasas sintéticas*, basadas en aceites lubricantes sintéticos, como las polialfa olefinas (PAO), ésteres o siliconas. Por lo general el rango de aplicaciones de las grasas sintéticas es más amplio que las normales, sufren menos la oxidación y pueden utilizarse a temperaturas tan bajas como $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pueden contener jabón de litio, bentonita o politetrafluoretileno (PTFE), este último un lubricante sólido de muy bajo factor de fricción.

Las grasas sintéticas son muy utilizadas en aplicaciones tales como dispositivos de instrumentación y control de aviones, robots y satélites.

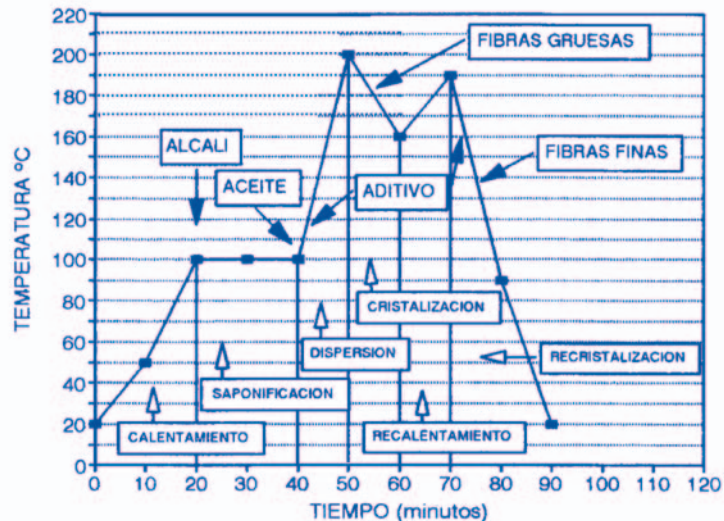
Pueden prepararse grasas sin jabones, utilizando diversos espesantes para el aceite base, como sílice, bentonita u otras tierras aptas, negro de humo, grafito, etc. Las combinaciones de productos químicos orgánicos como indantreno o ftalocianina, con aceites sintéticos, pueden suplantar los jabones con ventajas, pero suelen resultar antieconómicos.

5.3.6. FABRICACION DE GRASAS

La fabricación de grasas conserva en la actualidad un alto componente artesanal, que hace que las fórmulas y los métodos de obtención traten de mantenerse como "conocimiento" del fabricante. En general se utilizan procesos en "batch", en un reactor, autoclave o caldero abierto.

Los sistemas continuos son posibles y en las grandes empresas se utilizan con buenos resultados, aunque no se adaptan para las preparaciones de grasas especiales, generalmente de producciones limitadas.

Fig. 54- Fabricación de grasas



En la preparación discontinua se pueden diferenciar los siguientes pasos, siguiendo la Fig. 54, y utilizando un equipo como el esquematizado en la Fig. 55:

- 1.- *Calentamiento* - En la Fig. 55 se ha supuesto trabajar a presión atmosférica, por lo tanto se llega a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ calentando el ácido graso.
- 2.- *Saponificación* - A los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ se comienza a agregar el álcali, en forma directa al caldero o por recirculación exterior, realizando la saponificación del ácido graso.
- 3.- *Dispersión* - Terminada la saponificación se agrega el aceite, comenzando la solubilización del jabón, durante la operación se aumenta progresivamente la temperatura hasta uno $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Algunos aditivos

pueden ser agregados en esta etapa.

4.- *Cristalización* - Durante la disminución de temperatura comienzan a formarse las fibras del jabón que precipita, del régimen de enfriamiento depende el tamaño de las fibras. En esta etapa se forman las fibras largas, de mayor (L/D)

5.- *Recalentamiento* - La elevación de temperatura detiene el crecimiento de las fibras y las redisuelve en parte, esta operación es fundamental en el tamaño final de las fibras, formando parte del "arte" de preparar grasas.

6 - *Enfriamiento* - El enfriamiento debe ser rápido, o por lo menos controlado a los efectos de lograr el tamaño final deseado en las fibras y la gelificación correcta. Agregado de aditivos; en esta etapa se agregan generalmente los EP.

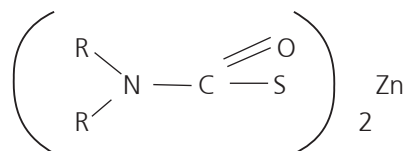
Una vez preparada la grasa, en el mismo equipo, se procede al desaereado, por aplicación de un suave vacío, luego se puede pasar por molinos coloidales y filtros de 40 mesh, finalmente se envasa. El molino coloidal se utiliza tanto para mejorar el grano de la fibra de la grasa, como para homogeneizar el producto. El molino consiste en un tambor que gira a gran velocidad en el interior de otro fijo, pasando el gel entre ambos, el material se somete a un esfuerzo cortante intenso y a una fuerza centrífuga vigorosa que producen una dispersión excelente.

Cuando se preparan grasas con espesantes no jabones, se dispersa el espesante en el aceite y se muele la mezcla en molinos especiales, en una operación que debe ser correctamente ejecutada por ser la parte fundamental del proceso. En general las grasas sintéticas y con espesantes no jabones ocupan un rango limitado del mercado total.

5.3.7. ADITIVOS PARA GRASAS LUBRICANTES

Los materiales que se mencionaron anteriormente como aditivos, bentonita, grafito, etc., por los porcentajes en que se encuentran generalmente presentes (10 a 50%), no serían precisamente aditivos, sino componentes. Consideraremos como aditivos a los compuestos que se agregan en pequeñas cantidades como inhibidores de oxidación, corrosión, antidesgaste y desactivadores de metales. La mayoría de los aditivos mencionados en lubricantes líquidos pueden ser usados con las mismas funciones en las grasas.

Entre los aditivos multipropósito más utilizados se encuentran los ditiocarbamatos (DTC), que pueden ser de cobre o , mejor considerados modernamente, de cinc.



La acción antioxidante está relacionada a la reacción del DTC con los peróxidos iniciadores de la cadena de reacciones, mientras que la desactivación de los metales resulta de la formación de un film protector por intercambio del metal del compuesto con el del cojinete, que adhiere el producto químico a las superficies. Esta capa de aditivo formada en parte por reacción química y en parte quimisorbida, tiene además funciones de EP moderado en caso del Zn y el Cu.

El DTC de plomo, en mezcla con naftenato de plomo, en un efecto sinérgico, produce un multipropósito de mejores cualidades EP que los anteriores, si bien resulta moderado antioxidante y desactivador. Un DTC-Sb, se informa buen EP y antióxidante, difuncional, que también se potencia como EP con pequeñas cantidades de naftenato de plomo. El DTC-Mo,

sustancia sólida, se utiliza como EP y moderado antioxidante. En la Tabla 38 se muestran resultados comparativos de ensayos con distintos aditivos en distintas concentraciones. Se ha agregado el PANA (fenil alfa - naftil amina), muy utilizado antiguamente pero abandonado en la actualidad por razones de contaminación ambiental.

Fig. 55- Caldero de fabricación de grasas

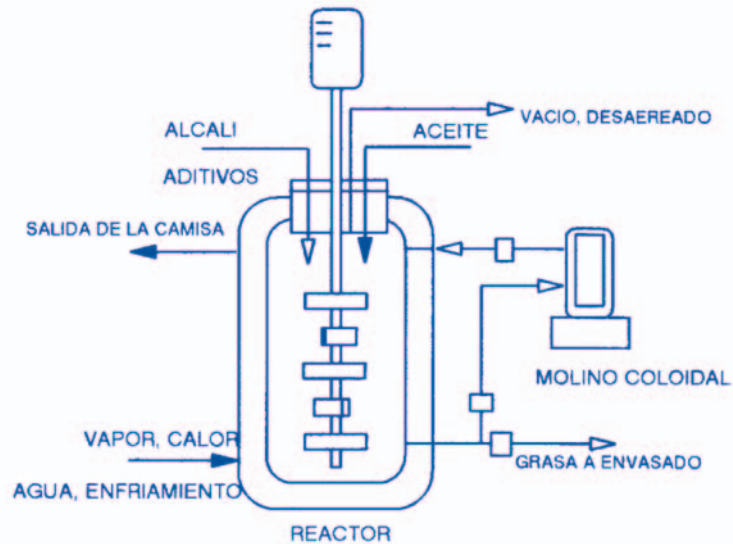


TABLA 38
ENSAYOS CON ADITIVOS PARA LUBRICANTES

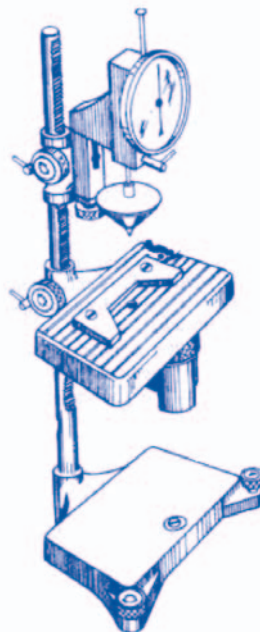
PRODUCTO	ACEITE BASE	ACEITE BASE +0,25% DTC-Zn	GRASA Li +0,25% DTC-Zn	GRASA Li +0,5% PANA	GRASA Li +3% DTC-Mo	GRASA Li +3% S2 Mo	GRASA Li 1%DTC -Pb	GRASA Li 1%DTC - Pb+0,5 % NAFTA Pb
ENSAYO								
OXIDACION ASTM D-942, Δ PRESION A 100 hs	-	-	2	0	6	40	-	-
200	-	-	2	2	-	-	-	-
300	-	-	3	3	-	-	-	-
400	-	-	4	3	-	-	-	-
500	-	-	5	5	-	-	-	-
Δ%VISC.A 100 hs	38,4	1,8	-	-	-	-	-	-
COLOR ASTM	8	3,5	-	-	-	-	-	-
LODOS	MUCHOS	NADA	-	-	-	-	-	-
TAN	6,44	0,07	-	-	-	-	-	-
TIMKEN, lb	-	-	-	-	-	-	40	50
4 BOLAS								
Pto.SOLDAD., Kg	-	-	-	-	252	251	-	-
DIAM.HUELL A mm	-	-	-	-	0,385	0,595	-	-

En la Tabla 39 se muestran análisis típicos y composiciones de distintas grasas.

TABLA 39 ANÁLISIS TÍPICOS DE GRASAS LUBRICANTES

TIPO GRASA	LITIO NGLI - 0 EP	LITIO NGLI - 0 EP	LITIO NGLI - 0 EP	CALCICA NGLI - 0	LITIO NGLI - 0
COMPOSICION					
ACIDOS GRASOS	3,5	4,5	7,8	18	10
ACEITE RICINO HIDR.	3,5	4,5	7,8	-	10
HIDROXIDO DE LITIO	0,7	0,9	1,2	-	1,6
HIDROX. DE CALCIO	-	-	-	2	-
NAFTENATO DE Pb	2,2	2,2	1,5	-	1,5
INHIBIDOR CORROS.	1,1	1,1	0,5	-	0,6
POLIBUTILENO	-	-	0,2	-	0,3
ACEITE BASE NAFTEN.	89	86,8	81	80	76
ANÁLISIS					
ASPECTO	FIBROSO	FIBROSO	SUAV-FIBR.	SUAVE	SUAV-FIBR.
PENETRACIÓN	360	310	270	270	220
P-60	365	320	275	280	225
Δ% P-100000 / P-60	30	28	25	35	20
PUNTO DE GOTEO °C	185	193	200	85	198
CORROS.24hs-100°C	PASA	PASA	PASA	PASA	PASA
AGUA %	0,1	0,05	0,1	0,5	0,05
ESTAB.OXIDACIÓN					
PER.PRES. 100 hs, Kg/cc	0,3	0,2	0,3	0,5	0,3
PERD.PRES. 400 hs	1,1	1	0,9	1,2	1,1
4 BOLAS, Ø HUELLA, mm			0,350	0,500	0,400
TIMKEM, lb	80	75	55	45	50

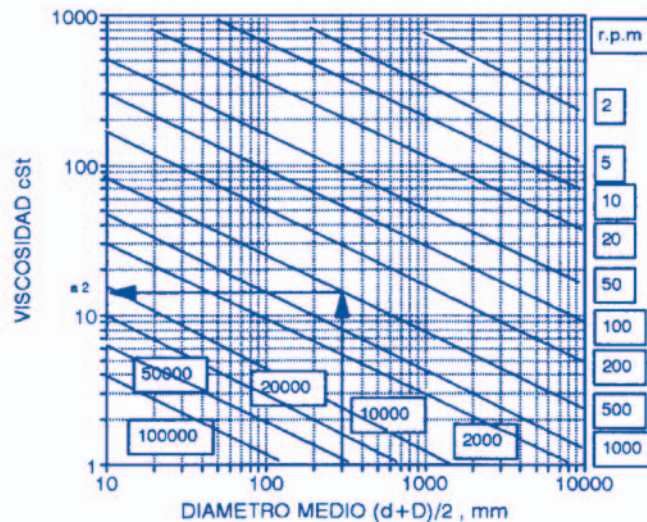
Equipo para la
determinación de
Penetración en grasas
lubricantes
ASTM D 217



6. LUBRICACION APLICADA

En este apartado se intentará completar aquellos aspectos no tratados anteriormente por ser más específicos de aplicaciones y de carácter práctico o, comunes a los distintos lubricantes.

Fig. 56- Selección de lubricantes, 1



Es aconsejable lubricar con aceite los rodamientos que funcionan a altas temperaturas, o cuando los intervalos de relubricación con grasas resultaran demasiado cortos, como así cuando el resto de la aplicación está lubricada con aceite, o cuando evacuar calor del medio resulte imperioso. A la hora de seleccionar recordar que, según los fabricantes de rodamientos, el 90 % se lubrican con grasa, como así que la correcta selección del lubricante es fundamental para la vida del mismo.

6.1. LUBRICACION DE RODAMIENTOS

La vida de un aceite mineral de buena calidad, bien especificado para el mecanismo industrial que se trate, depende de la temperatura y, poniendo como media unos 60 - 70 °C, se puede estimar que en servicio normal durará más de dos años (los modernos lubricantes para el automotor en servicio moderado, no muy "batidos" por altas velocidades, pueden ser usados más de 10000 Km.). A 100 °C una estimación de 6 meses a 1 año será razonable para lubricación industrial, pero se harán ensayos periódicos luego de los tres meses. Si la temperatura normal de trabajo supera los 100 °C, puede resultar necesario el uso de aceites sintéticos.

La viscosidad es el factor más importante en la selección del lubricante, la cual debe responder a las condiciones de trabajo y al tamaño del rodamiento. El diseño o la experiencia, generalmente indican la temperatura de trabajo del mecanismo, que difiere de la informada por los fabricantes del lubricante para expresar sus propiedades. Por lo general se conocen las viscosidades a 40 y/o 100° C, siendo necesario calcular la correspondiente a la temperatura de trabajo, para luego verificar que grado SAE corresponde a nuestro mecanismo.

La Fig. 56 (que será usada en conjunto con la Fig. 57), permite encontrar la viscosidad cinemática requerida en función del tamaño del cojinete (diámetro medio; interior más exterior sobre dos) y de la velocidad de trabajo. Esta viscosidad deberá darla el lubricante a la temperatura de trabajo del mecanismo, siendo por lo tanto necesario recalculer la viscosidad para una de las temperaturas informadas por los fabricantes de aceites y determinar el grado SAE necesario.

La propiedad del lubricante que nos permite los cálculos mencionados es el IV, basándose en el mismo, la Fig. 57, informa la viscosidad a, por ejemplo 40°C (o 100°C), conocida la viscosidad de la Fig. 56 y la temperatura de trabajo del cojinete (70°C). La aplicación de la figura supone un aceite con 85 de IV, representando desviaciones a ese IV desviaciones en el resultado final que no invalidan en aplicaciones industriales el sistema, dado que los aceites lubricantes se fabrican con un IV en el rango de 80 - 90. Conocida la viscosidad a 100°C podremos encontrar que grado SAE corresponde a nuestra necesidad por aplicación de la Tabla 7.

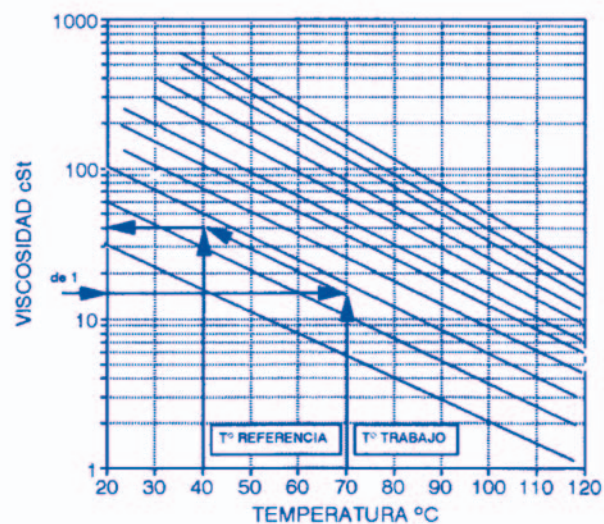
La selección de un lubricante de mayor viscosidad que la especificada aumentará la vida útil del rodamiento, limitando esta posibilidad la temperatura, que podrá llegar hasta un límite práctico inadmisibles. Además se producirá un aumento en la necesidad de potencia para el movimiento, que también será evaluado por el usuario. Si por el contrario, por alguna razón como disminuir la potencia requerida o bajar la temperatura, decidimos usar un aceite de menor viscosidad de la requerida, será conveniente el uso de un EP, para compensar el trabajo en las zonas de lubricación en película delgada o capa límite del sistema.

La lubricación por líquidos puede hacerse por simple baño de aceite, utilizando para la circulación la succión de la propia rotación del mecanismo. Cuando la maquina esta parada el nivel de lubricante cubrirá hasta el centro del elemento rotante, bola o rodillo, inferior. La Fig. 58, a, muestra esquemáticamente este tipo de lubricación, correspondiendo su uso a aplicaciones no muy comprometidas por temperatura, carga o velocidad.

Una instalación apta para trabajo más pesado se representa en la Fig. 58, b, donde se ha agregado un enfriador para quitar calor al sistema y un filtro que limpie el aceite antes de reciclar al mecanismo. En este caso se dispone de un depósito de aceite, del cual se puede sacar muestra para análisis de control y reponer pérdidas.

Para trabajo a alta velocidad, cuando el lubricante puede ser expulsado del mecanismo, se utiliza la lubricación por chorro de aceite, Fig. 58, c, dirigiendo el chorro al rodamiento, a una velocidad de unos 15m/seg.

Fig. 57- Selección de lubricantes, 2



En la lubricación por grasa, por regla general, la grasa se carga al mecanismo después del montaje de todo el equipamiento, en un ambiente limpio, a los efectos de evitar contaminaciones. La cantidad de grasa debe llenar el espacio del rodamiento, pero dejará lugar en el soporte, un 30%, para permitir expansión por temperatura, movimiento por vibraciones y el propio giro del cojinete. Cuando se utilizan grasas de litio, se puede llenar hasta el 90% sin inconvenientes, en condiciones normales de funcionamiento.

El engrase del rodamiento en sí, dependerá de si es desarmable o no. En el primer caso se lo desarmará y engrasará parte por parte siguiendo la secuencia de armado. En los no desarmables se aplicará grasa en ambas caras, llenando todos los espacios entre los elementos rotantes. Una vez colocado el cojinete en su soporte, las características de este último determinarán la forma de aplicación del resto de la grasa. La aplicación de grasa a presión, por ejemplo por pistola neumática, debe ser usada con precaución para no dañar los retenes del mecanismo.

En la Fig. 59 se muestra un diagrama resumido que da los intervalos de relubricación para rodamientos radiales a bolas con grasas de litio, en función de las revoluciones y el diámetro menor del elemento. Estos rodamientos, cuando son pequeños, pueden ser "sellados" o lubricados de por vida, dada su prolongada vida útil. Los rodamientos de rodillos deben ser reengrasados más seguido que los de bolas, encontrándose en la bibliografía (8.54) diagramas completos para estos fines.

La Fig. 59 resulta útil si la temperatura de trabajo no supera los 70°C, debiendo reducir a la mitad los tiempos indicados por cada 15°C de aumento. Los rodamientos colocados en ejes verticales deben ser relubricados con más frecuencia, informándose que es aconsejable reducir a la mitad los tiempos estimados con la figura últimamente mencionada.

El uso de diagramas generales como los indicados, supone un uso normal del mecanismo, en ambiente no contaminante ni con mucha humedad.

Por regla general se debe usar el mismo tipo de grasa en las sucesivas relubricaciones del rodamiento, salvo que se proceda a una limpieza total de la anterior o haya seguridad de compatibilidad. En los rodamientos lubricados en períodos largos, los soportes suelen contar con tapas para conectar engrasadores manuales externos. Cuando el reengrase debe ser frecuente es conveniente que el mecanismo cuente con una "grasera" con conducto de llenado permanente.

Cuando no se cuenta con la información de los fabricantes, se debe estimar que los aceites industriales tienen normalmente un *IV* entre 85 y 95, como que el aceite contenido en las grasas no supera 70 de *IV*. Los modernos aceites para automotores, indicados como multigrados (15W-40), primeras calidades de los fabricantes, rondan los 140 de *IV*, mientras que los lubricantes catalogados como normales, tienen generalmente entre 95 y 100 de *IV*.

6.2. LA LUBRICACION DEL AUTOMOTOR

Los automóviles europeos se presentan como más exigentes en cuanto a lubricación y calidad del lubricante, por trabajar generalmente más comprometidos por tener mayor relación de compresión, revoluciones y temperatura que los norteamericanos. Por la razón indicada nos referiremos a este tipo de vehículos en este apartado, siendo aplicables a todos los motores los comentarios.

Los límites máximos y mínimos de cada grado de aceite están vinculados a la posibilidad de arranque en frío (las bajas viscosidades) y de protección al desgaste (las altas). En la Fig. 60 se muestra una recopilación de ensayos de organismos europeos sobre el arranque de una serie de vehículos bajo prueba, funcionando con distintos grados SAE de aceites y a distintas temperaturas. La figura deja en claro la sensibilidad de la viscosidad con la temperatura, utilizando como medida las dificultades que esta última le acarrea al arranque del automotor. El grado 5W, corresponde a climas árticos, con lo cual el 50% de los coches arrancarían a -20 °C, mientras que el 10W satisface al 50% a -17 °C, estos aceites fueron preparados en los límites máximos de su especificación, Tabla 40.

TABLA 40 VISCOSIDADES CCS DE ACEITES W

Valores de Tabla 7 Aceite grado	Viscosidad CCS mínima, a -18 °C Poises	Viscosidad CCS máxima, a -18 °C Poises
5W	-	12,5
10W	12,5	25
20W	50	100

Como grado 20W, en la Fig. 60, figuran tres aceites, estando uno cerca del mínimo de la especificación, otro en la mitad y el último en las cercanías del máximo de la Tabla 40. Deducimos que mientras entre los grados 5W y 10W hay 3°C de diferencia, el grado 20W por sí solo, cubre un rango mayor, 5°C de diferencia de temperatura ambiente.

Todos los grados mencionados cumplen con el 50% del parque a -12 °C. Las viscosidades que permiten un buen arranque a bajas temperaturas, resultan ser muy bajas cuando el motor logra su temperatura de trabajo, generalmente más de 100 °C, causando consumo excesivo y desgaste.

Fig. 58- Sistemas de lubricación

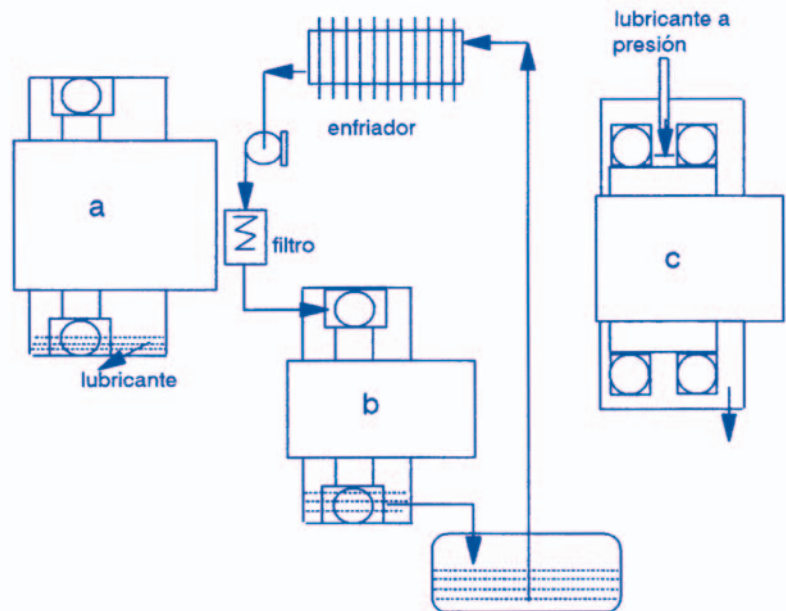
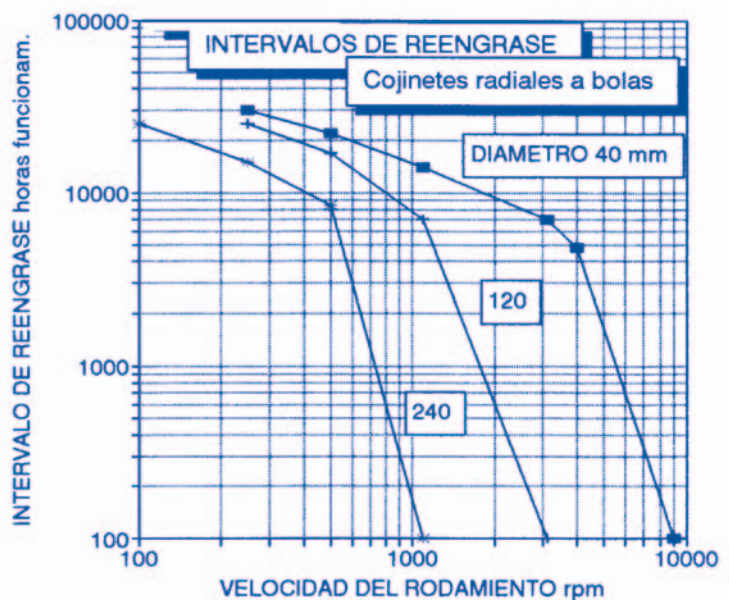
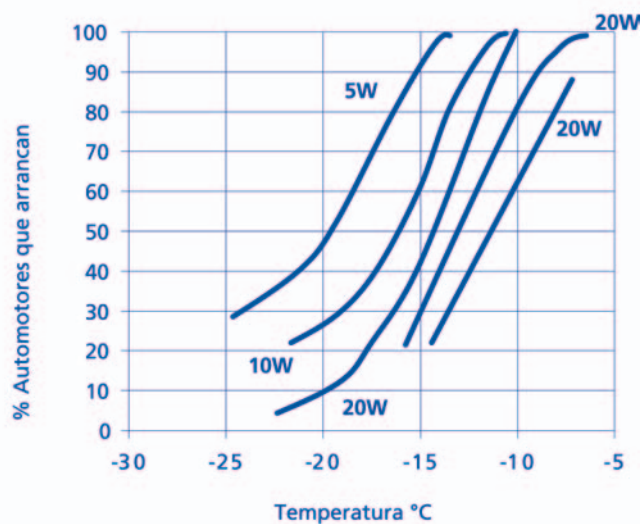


Fig. 59- Intervalos de Reengrase



Los fabricantes europeos encontraron que el grado 15W resultaba apto desde -8 (100%) a -16 °C (50%), cumpliendo con todos los climas del invierno, salvo el norte, que puede llegar a una temperatura de -20°C, caso que cubriría solo el 20% del parque. El grado 20W resultó, según este estudio, de alta viscosidad, permitiendo el arranque al 50% del parque a -12 °C en el límite alto de la especificación, frente a temperaturas probables de -15 °C en la Europa Central.

Fig. 60- Porcentaje de automotores que arrancan en función del SAE del aceite y la temperatura ambiente



6.2.1. EL CAMBIO DE ACEITE

Los modernos lubricantes del automotor tienen, entre otros, aditivos detergentes y dispersantes. La acción del detergente, jabones metálicos, es limpiar el motor desprendiendo las partículas carbonosas que, de acumularse, formarían costras, mientras que el dispersante las mantiene en suspensión en el seno del aceite. Esta acción combinada hace que a poco de cambiar el aceite este comience a oscurecerse, en un proceso que debe considerarse normal.

Una medida práctica y semi cuantitativa de la materia carbonosa dispersa en el aceite usado se logra, dejando caer una gota del mismo sobre un papel de filtro cuantitativo, de grano medio. Si bien la interpretación es subjetiva, utilizando siempre el mismo papel, o sea igual grano, la experiencia puede ir mejorando las conclusiones. Como orientación resulta que si la mancha negra de las partículas carbonosas se concentra en el centro, difundiéndose como aureola una mancha clara, el aceite a perdido o no tiene efectos dispersante, pudiendo formar costras en el motor. En cambio si la mancha se difunde más, a pesar de un centro obscuro, el lubricante mantiene su efecto dispersante. La intensidad de las manchas negras será una medida aproximada de la cantidad de carbón contenida en el aceite.

La viscosidad es otra de las propiedades del lubricante que varían con el uso, si bien para una determinación precisa es necesario equipamiento de laboratorio, en el campo se puede hacer una aproximación relativa. Si se cuenta con una muestra del aceite usado y una del mismo aceite nuevo, ambos a temperatura ambiente, se puede medir el tiempo que tarda en drenar una pipeta de vidrio igual cantidad de los dos aceites. A mayor tiempo mayor viscosidad.

Los cambios de viscosidad indican dos tendencias, por un lado si esta disminuye, se debe sospechar seriamente de una contaminación con nafta (o gas oil) en el carter. Si lo que se produce es un espesamiento, un aumento de la viscosidad, el aceite se está oxidando, pudiendo llegar en situación extrema hasta transformarse en una pasta gelatinosa. Generalmente los aumentos de viscosidad son una función de la temperatura, la cual depende de la carga a la que se somete el motor, como del retraso del encendido, de la calidad antidetonante del combustible, la relación combustible aire, en suma, de la calidad de la

combustión. Una mala combustión puede llevar a la producción de una cantidad anormal de óxidos de nitrógeno, los cuales al reciclar al carter, aumentan la oxidación del aceite. Otra causa a estudiar, de producirse aumento de temperatura, es el estado del sistema de refrigeración.

Es importante determinar oportunamente el comienzo del deterioro por oxidación del aceite, dado que rápidamente se produce un efecto combinado de: aumento de viscosidad, aumento de fricción, mayor aumento de temperatura, menor circulación del aceite, menor refrigeración por parte del aceite..., que llevará a colapsar el lubricante, transformándolo en una pasta.

Cantándose con el equipamiento apropiado de un laboratorio, los análisis más comunes para determinar contaminación de aceite serían:

Viscosidad ASTM D 445 - 97
Punto de inflamación, ASTM D 92 - 97
Destilación, ASTM D 86 - 97
Agua y sedimentos, ASTM D 96 - 94
Agua, ASTM D 95 - 83
TBN, ASTM D 2896 – 98, D 4739 - 96
Numero de precipitación, ASTM D 91 – 97

El punto de inflamación esta relacionado a la contaminación con nafta (o gas oil), la cual en pequeña proporción es inevitable. Con el ensayo de destilación se puede determinar la cantidad de contaminante. En el caso de los motores Diesel se estima que un 10% de contaminación produce un 20% de variación en la viscosidad, llevando el punto de inflamación a unos 170 °C, resultando estos valores límites aceptables para el cambio de aceite. En los motores a nafta la contaminación límite aceptable generalmente ronda el 5%, con la cual el punto de inflamación puede ser más afectado.

La contaminación con agua debe estar en el orden del 0,5% máxima para el cambio de aceite, si se encontrara más que esa cantidad en uso normal, se debe revisar la estanqueidad del sistema de refrigeración.

Los ensayos de *Agua y sedimentos*, *Agua y Número de precipitación* son correlacionables, resultando que con el agua en un 0,5%, si los sedimentos o los precipitables se encuentran en un máximo de unos 2 a 2,5%, con el resto de valores normales, un cambio de filtros suele ser suficiente. Cuando esos valores son sobrepasados, se requiere un cambio de aceite.

Con respecto al TBN, su variación esta relacionada a la aparición de sustancias ácidas producto de la contaminación y el deterioro del lubricante. Resulta aconsejable mantenerse en el lado alcalino, o sea con un remanente de base para la neutralización, utilizando preferentemente el método ASTM D 2896, que indica el número de base real, incluyendo los aditivos. El cambio de aceite debería programarse al llegar a 0,5 – 1 de TBN.

Normalmente el cambio de aceite en los automotores se realiza por kilometraje, sin análisis. Por lo tanto se pueden establecer reglas generales, aplicables a la utilización de buenos lubricantes, de última generación, en automóviles modernos en estado mecánico aceptable. No obstante no realizar análisis, en cada cambio de aceite se puede observar y preguntar el estado del aceite drenado en lo que hace a su consistencia y presencia de agua. En todo caso cada fabricante establece sus propias directivas, las cuales serán respetadas por los adquirentes.

Un servicio moderado (SM), estará representado por un vehículo que no llega a 10000 Km por año, funcionando períodos cortos con muchas y prolongadas paradas, con un 50% de los kilómetros en ruta a velocidad normal. Si hablamos de servicio normal (SN), se tratarán de unos 20000 Km/año, con un 50% en ruta a velocidades en los límites máximos permitidos. El servicio severo (SS), corresponderá a vehículos taxis, policías, ambulancias o particulares con

más de 20000 Km al año, a altas velocidades o con cargas como casas rodantes, con posibles frecuentes cambios de conductores.

En SM el cambio de aceite se hará por tiempo más que por kilómetros, resultando aconsejable cambiar aceite y filtro una vez por año. El almacenamiento en contacto con partículas metálicas y carbón, sumado a la *respiración* de los contenedores (carter) con la humedad, la temperatura y la presión atmosférica, deterioran el aceite naturalmente.

Si se trata de SN, 12000 Km resultan razonables para el cambio de aceite, el cambio de filtro puede coincidir con el cambio de aceite, si no se pasa de 6 ó 7 meses el hacer dichos kilómetros.

Cuando el régimen de marcha entra en SS, los cambios de filtro y de aceite se deberían hacer entre los 5000 y los 8000 Km, de acuerdo a la severidad real de la prestación. Como límite para el cambio de filtro resulta adecuado no pasar de 3 meses a la severidad indicada.

6.3.- RECUPERACION DE ACEITE USADO

La recuperación de aceite usado como lubricante ha dejado de tener la importancia que tenía desde hace unos 15 años. La creciente demanda de calidad por las normas SAE o API han resultado una barrera, dado los costos necesarios para adaptar las tecnologías de recuperación.

Los procesos antiguos comprendían:

- Remoción del agua y partículas sólidas por decantación o centrifugación.
- Operación tipo flash para eliminar nafta contaminante.
- Tratamiento con ácido sulfúrico para remover gomas y otros no saturados.
- Lavado con soda cáustica para neutralizar el ácido.
- Lavado con agua para eliminar la soda remanente.
- Contacto por percolación sobre arcillas para mejorar color.
- Filtrado para eliminar la arcilla.

Salvo la operación de destilación, que resulta en un liviano tipo nafta aprovechable y el aceite a tratamiento, todas las demás etapas generan residuos peligrosos en cantidades apreciables y de muy difícil disposición. Un aceite tratado con estos métodos no cumpliría con las mínimas exigencias de las normas API, entrando en cantidades mínimas en aceites compuestos con nuevos.

El tratamiento que mejor se adapta, dando un aceite recuperado útil, comprende:

- Remoción del agua y partículas sólidas por centrifugación.
- Destilación a vacío moderado para separación livianos y secado final.
- Extracción con propano de lodos, resinas, lacas y metales.
- Hidroterminado para saturación y eliminación de metales remanentes.
- Contacto con arcillas para mejorar color.

Puede observarse que por los procesos necesarios, el tratamiento es una tecnología de costo considerable, no siempre competitiva con los aceites nuevos.

En la Tabla 41 se muestra un ejemplo de análisis antes y después de un tratamiento de regeneración similar al último mencionado. Es notable que el *Índice de Viscosidad* disminuyó, siendo el resultado de la eliminación del aditivo correspondiente, lo que lleva al *IV* al valor del aceite base.

El contenido de plomo de la Tabla 41, para el producto tratado, puede resultar menor por los bajos niveles de plomo en las naftas actuales. De todas formas los metales contenidos en los aceites usados representan valores altos, que perjudican notoriamente la hidrogenación que es un proceso catalítico. El aceite recuperado tendrá una mayor concentración de

contaminantes metálicos que el aceite nuevo, incrementando el contenido de cenizas de la mezcla final con aditivos.

La viscosidad del aceite recuperado disminuye luego del tratamiento, debiéndose considerar que el aceite usado sin livianos, se encuentra *espesado* por oxidación y que el tratamiento elimina los compuestos polimerizados de oxidación, de alto peso molecular.

Resultan notables la disminución de color, número de ácido, cenizas y metales luego del tratamiento.

TABLA 41 TRATAMIENTO DE REGENERACIÓN DE ACEITE USADO
Análisis típicos

Propiedad	Aceite usado deshidratado y desnaftado	Aceite recuperado por propano e hidrogenación
Peso específico	0,0	0,88
Viscosidad a 40°C, cSt	130	98
Índice de Viscosidad	102	99
Carbón Residual Conradson, %p	2,2	0,23
Número de Acido	2,4	0,05
Cenizas %p	1,6	< 1
Color	> 8	< 2
Contenido de metales, ppm		
Bario	≈ 1000	>0,5
Calcio	≈ 1000	< 1
Fósforo	≈ 600	< 10
Plomo	≈ 250*	< 1
Cinc	≈ 500	< 0,5
Hierro	≈ 600	< 0,5

* En vehículos que usaron siempre naftas sin plomo, el contenido puede ser ≈ 1, producto del desgaste de cojinetes. Si se ha usado siempre plomo y se continuó usando, el valor puede ser ≈ 10000 ppm.

6.4. LUBRICACION POR GAS

Los gases pueden ser utilizados como lubricantes en la misma forma que los líquidos ya sea en sistemas hidrodinámicos o presurizados externamente. Durante el funcionamiento de un mecanismo, un cojinete, se formará la cuña de lubricación contra la abertura de la excentricidad, que soportará la carga del eje, en la misma forma que con los líquidos.

Si bien se cumplen todas las leyes de la lubricación por líquidos, en el caso de los gases, por su baja viscosidad, aparecen algunas limitaciones y condiciones especiales:

Deben operar a altas velocidades para compensar las bajas viscosidades.

El pulido de las superficies y las tolerancias para la precisión del mecanismo deben ser muy superiores, por ser la capa de lubricantes de muy poco grosor.

Para obtener las mismas presiones diferenciales en el pasaje de la excentricidad, se necesita un flujo de materia mayor que en los líquidos.

La capacidad de carga sobre el eje o muñón es menor.

El costo de diseño y fabricación es alto, debiendo estar justificada su necesidad por lo especial del mecanismo a lubricar.

El gas a suministrar debe ser extremadamente limpio, estable en las condiciones de operación y no atacar las superficies en contacto.

Los gases más comúnmente usados son el aire, el nitrógeno y el helio, si bien puede ser usado cualquier gas obtenible a presión para facilitar la presurización externa.

Entre las ventajas más importantes de la lubricación por gas se pueden mencionar:

Si el gas es suficientemente estable, no ataca las superficies y no ocurren cambios químicos en su composición, puede ser usado en una ancha gama de temperaturas, -250 a +2000 °C.

La viscosidad aumenta con la temperatura.

Trabaja produciendo muy baja fricción, en un ambiente sumamente limpio, permitiendo una gran precisión en los mecanismos lubricados.

Un ejemplo clásico de aplicación de la lubricación a gas lo constituye el torno a turbina de aire de los dentistas, pudiendo mencionarse además las herramientas para pulido de alta precisión, los giroscopios inerciales, todas las turbo máquinas de alta velocidad, etc.

6.5. ESTADÍSTICAS

TABLA 42 VENTAS DE LUBRICANTES, GRASAS Y ASFALTO
Principales empresas productoras (Marzo 2000*)

	Unidad	DAPSA	EG3	ESSO	REFISAN	SHELL	YPF	TOTAL
Lubricantes	m ³	467	1497	2593	0	7273	8135	19965
Grasas	Tn	63	46	90	0	0	320	519
Asfaltos	Tn	1576	0	1972	6879	8925	23193	42545

*Suplemento Estadístico IAPG

7. ASFALTOS

Se conoce como *materiales bituminosos* a sustancias de origen natural u obtenidas por operaciones o procesos de elaboración del petróleo, como el vacío o la pirolisis, formadas por mezclas de hidrocarburos de alto peso molecular, con contaminaciones de otros materiales no destilados.

Cuando se trata de productos naturales o artificiales carbonosos, cuya procedencia no se identifica con el petróleo (Ejemplo: hulla, lignito, madera), suele denominárselos *alquitranes*, reservándose *asfaltitas* para sustancias bituminosas naturales quebradizas.

Los materiales bituminosos están formados principalmente por *betunes*, mezcla de hidrocarburos de origen natural o artificial, solubles en sulfuro de carbono y tetra cloruro de carbono, semisólidos, negros o muy oscuros, con características aglomerantes. Cuando los betunes que forman el material bituminoso provienen de la elaboración del petróleo reciben el nombre de *Betunes Asfálticos* o *Bitumen*. Cuando han sido tratados y dosificados para usos específicos, como para carreteras, las mezclas resultantes se conocen como *Asfaltos*.

Los petróleos contienen naturalmente betunes asfálticos disueltos y suspendidos en el cuerpo formado por hidrocarburos líquidos volátiles, de los cuales se separan por destilación de estos últimos. Los *betunes asfálticos*, se descomponen por destilación, por lo cual constituyen los fondos de destilación a vacío de los lubricantes o de la extracción con solventes en las unidades de PDA. Los petróleos de bajo Factor K, del tipo nafténico o mixto, contienen las mayores concentraciones de betunes asfálticos de buena calidad.

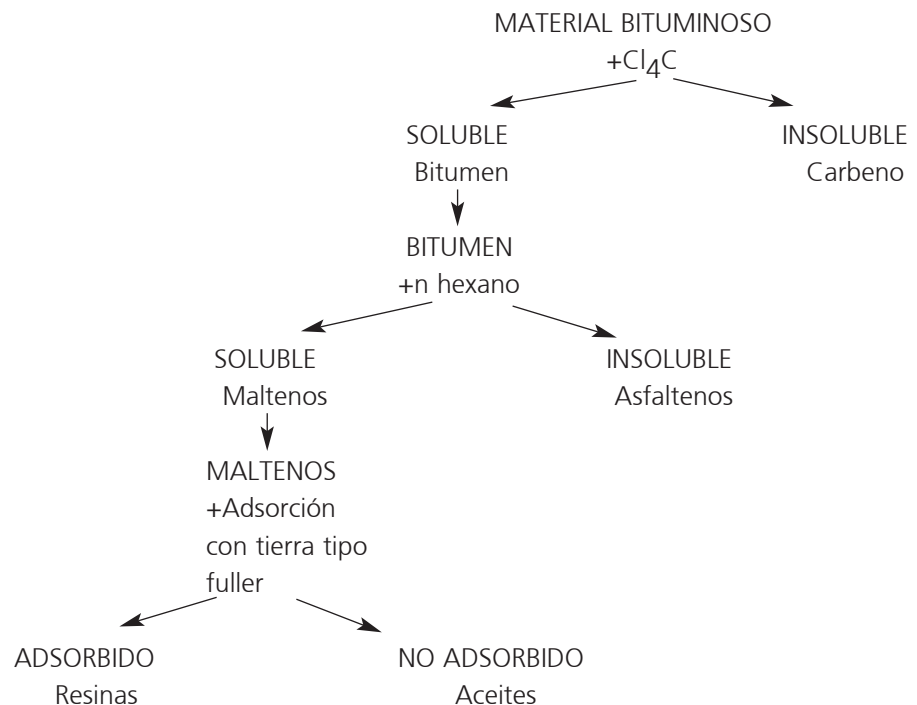
La composición química de los betunes asfálticos responde a una mezcla compleja de hidrocarburos de alto peso molecular, alifáticos, nafténicos, aromáticos y aromáticos condensados, con pequeñas concentraciones de órgano metálicos y compuestos polares de oxígeno, azufre, nitrógeno, etc. El peso molecular varía aproximadamente entre 500 y 7000, con una relación de número de átomos de carbono a número de átomos de hidrógeno, $N^{\circ} C / N^{\circ} H$, de 0,6 a 1,2, esta última para betunes con preponderancia de aromáticos altamente condensados. El agregado de materiales pesados de procesos de craqueo aporta olefinas y poliolefinas a la mezcla.

7.1. COMPOSICION QUIMICA APROXIMADA, MALTENOS Y ASFALTENOS

Si bien la natural complejidad de los sistemas multicomponentes de hidrocarburos hace muy dificultoso determinar las especies químicas presentes en los *materiales bituminosos* (o *materiales asfálticos*), se ha desarrollado una técnica de carácter empírica que permite agrupar los componentes con caracteres químicos semejantes. En resumen se trata de una separación con solventes selectivos, o precipitación fraccionada, que parte con el tratamiento con tetra cloruro de carbono. Se había mencionado en la definición de materiales bituminosos, su completa disolución en este solvente (o sulfuro de carbono), con lo cual se tiene la primer separación:

Solubles en Cl_4C	Betún asfáltico
Insoluble " "	Carbenos

El procedimiento se puede simplificar:



Los carbenos o insolubles en tetra cloruro de carbono, son las sustancias inorgánicas presentes como contaminantes más los hidrocarburos en vías de mineralización, con alta relación C/H, también denominados carboides. El contenido de carbenos está relacionado a la presencia de sedimentos en el petróleo crudo procesado, no superando generalmente un 0,2 – 0,5 %. Los carboides representan dentro de este porcentaje una cantidad generalmente pequeña 0,05 – 0,2%. El aspecto físico de los carbenos secos es de un material pulverulento

gris – negruzco, desmenuzable, que tienen el mismo significado que una carga inerte agregada ex profeso.

Los términos *carbenos*, *maltenos* y *asfaltenos*, no caracterizan especies químicas, solo se refieren a un grupo de sustancias con un comportamiento similar. En el caso de los *carbenos*; “todo insoluble en tetracloruro de carbono de un material bituminoso proveniente del petróleo”. El soluble en el solvente indicado, corresponde al betún asfáltico, o *bitumen*, que una vez evaporado el Cl_4C tiene un aspecto de sólido negro untuoso, que puede manchar los dedos por la presencia de livianos, que se ablanda con el aumento de la temperatura hasta tomar la consistencia de un líquido viscoso.

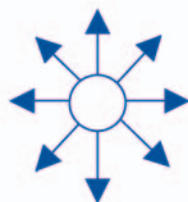
El betún asfáltico se disuelve en el n – exano (en la práctica se usa un corte de 60 a 80 °C, exento de benceno), obteniéndose un líquido y un precipitado, ambos de color negro. A las sustancias del betún que se disuelven en el n-exano, se las denomina *maltenos*, constituyendo una familia de comportamiento similar. Los insolubles conforman los denominados *asfaltenos*. En realidad el bitumen puede ser considerado un sólido con características reológicas de plástico, de naturaleza coloidal, donde los asfaltenos constituyen las miselas y los maltenos la fase líquida ocluida. Recuérdese que las grande moléculas tienen comportamiento de coloides.

La disolución de un sólido no polar en un solvente no polar esta regida por las fuerzas de atracción molecular, o fuerzas de van der Waals, que en este caso se denominan *fuerzas de dispersión*, al suponer un comportamiento de dipolo oscilatorio de las moléculas. La teoría de van der Waals consideraba que una molécula en el seno de un gas era requerida por las circundantes (Fig. 61), sin una fuerza resultante. En cambio en la pared del recipiente, donde se manifiesta la presión interna (P), el resto de las moléculas se encuentran de un solo lado, conformando una resultante hacia el centro R, Fig. 61. Como la teoría cinética de los gases no considera fuerzas de atracción molecular, la presión calculada (ideal) resulta mayor que la presión real (P), debiéndose agregar un factor de corrección a la presión real para obtener la presión del gas ideal.

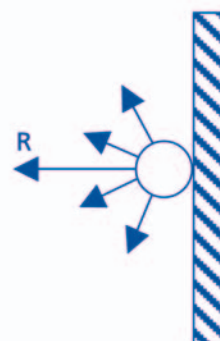
El factor será por lo tanto proporcional al número de moléculas por unidad de volumen (n) y al número de choques contra la pared, también relacionado a n, resultando en definitiva proporcional a n^2 . El numero de moles por unidad de volumen es inversamente proporcional al volumen de un mol, por lo tanto la fuerza de atracción variara con $1/V^2$.

$$\text{Presión corregida (ideal)} = P + (a/V^2)$$

Fig. 61- Atracción molecular



Atracción molecular en el interior del gas



Atracción molecular contra la pared del recipiente

La constante *a* es una de las constantes de van der Waals, la otra constante, *b*, denominada *covolumen*, corrige el volumen real (V) que es mayor que el ideal por cuanto las moléculas tienen un volumen que ocupa parte del espacio disponible para su movimiento.

$$\text{Volumen corregido (ideal)} = V - b$$

La ecuación de estado de van der Waals para un mol de gases reales resulta:

$$(P + a/V^2)(V - b) = RT$$

$$P + a/V^2 = RT/V - b$$

Aplicando la ecuación de van der Waals a los líquidos a/V^2 es una expresión de la presión interna, donde V , volumen molar, depende la especie química.

La facilidad de disolución esta relacionada a interacciones favorables entre las fuerzas de atracción de las moléculas del soluto, del solvente y del sistema soluto – solvente. A medida que crece V , volumen molar, disminuye la presión interna, disminuyen las fuerzas de van der Waals. El caso que estamos tratando se refiere a los hidrocarburos, que conforman según ya se vio, sistemas multicomponentes, habiéndose determinado experimentalmente que a medida que crece la diferencia entre a/V^2 del soluto y solvente disminuye la solubilidad.

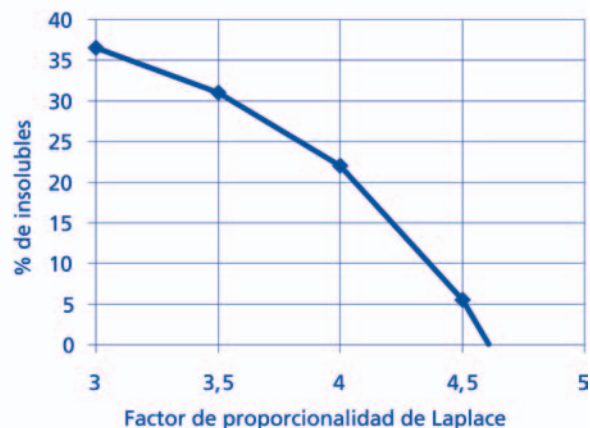
Si bien los valores de a y b para los líquidos no son seguros, Laplace (8.58) vinculó las fuerzas de atracción con la tensión superficial(γ) y el volumen molar(V), suponiéndolas proporcionales al termino: $\gamma \cdot V^{-1/3}$. La correlación resultó gráfica, mostrándose en la Tabla 43 y la Fig. 62 un ensayo real tomado de (8.58), donde se observa una relación continua entre ($\gamma \cdot V^{-1/3}$) y el *insoluble* de un asfalto en distintos solventes. A medida que aumenta el peso molecular del solvente, aumenta el volumen molar, acercándose al valor de las grandes moléculas del betún asfáltico, con lo cual la interacción entre soluto y solvente aproxima los valores de las fuerzas de van der Waals, aumentando la solubilidad.

TABLA 43 INSOLUBLES DE UN ASFALTO* EN DISTINTOS SOLVENTES

Solvente	$\gamma \cdot V^{-1/3}$	γ	Insoluble %
Normal pentano	3,25	15,3	33,5
Normal hexano	3,59	18,2	29,0
Normal Heptano	3,80	20,0	25,7
Normal nonano	4,03	22,7	23,6
Metil ciclohexano	4,20	23,0	15,1
Metil cicohexano	4,62	23,3	0
Eter de petróleo (60 – 80 °C)		19	23,8

* Asfalto de penetración 46 y punto de ablandamiento 57 °C

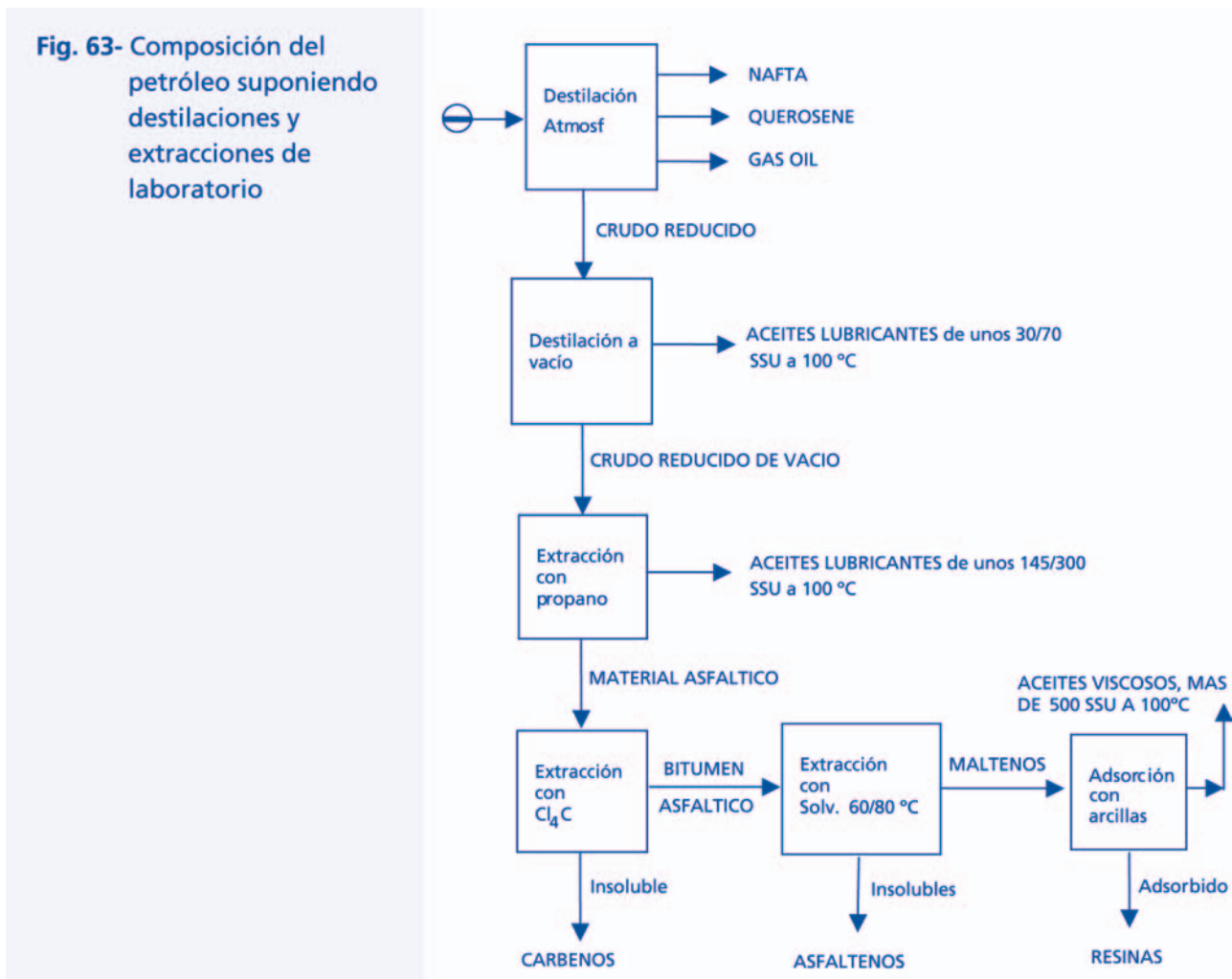
Fig. 62- Insolubles de un asfalto de penetración 46 y Pto. Ablandamiento 57°C, en función del factor de Laplace, $\gamma \cdot V^{-1/3}$, del solvente



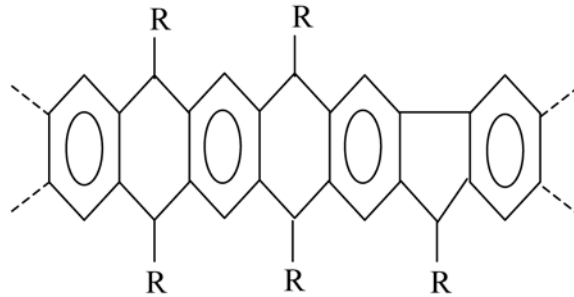
La Fig. 62 muestra que la fracción denominada asfaltenos es arbitraria, dependiente del solvente, que si se usa el corte 60/80 °C sin aromáticos, corresponde a un intermedio entre n-hexano y n-heptano. El mismo razonamiento vale para los maltenos, parte soluble del asfalto en el solvente indicado. Por evaporación del corte 60/80 °C, lo cual ocurre a bajas temperaturas, se obtienen los maltenos puros.

En vista de lo estudiado se puede hacer una nueva división en cuanto a la composición del petróleo, suponiendo operaciones de laboratorio de destilación, extracción con solventes y arcillas adsorbentes, utilizando; destilación atmosférica, a vacío, extracción con propano líquido (PDA), extracción con tetracloruro de carbono, extracción con corte 60/80 °C y adsorción con tierras tipo fuller. Obsérvese que el propano líquido extrae solubilizado un aceite más liviano que los maltenos, por estar el Factor de Laplace más alejado aún que en los otros solventes, aumentando por lo tanto los insolubles, entre los que quedan los maltenos.

En la Fig. 63 se ha representado la operación de laboratorio mencionada anteriormente, en la cual se parte de un petróleo al cual se aplican sucesivamente las distintas operaciones de separación conservativa.



Los asfáltenos son sólidos pulverulentos de color negro, tienen peso específico mayor que uno, por calentamiento se descomponen antes de alcanzar el punto de fusión. Tienen una alta relación C/H, mayor de 0,8, estando constituidos principalmente por aromáticos altamente condensados. Su estructura molecular puede tener la forma:



Los petróleos aptos para asfaltos de carretera, nafténicos de bajo Factor K, tienen entre un 10 y 20 % de asfaltenos. A medida que crece el contenido de asfaltenos los materiales se vuelven más quebradizos; las asfaltitas, por ejemplo, tienen un 70% de asfaltenos. A medida que aumenta el número de carbonos de los grupos R, los asfaltenos se ablandan, tomando carácter parafínico, deteriorando las propiedades reológicas del asfalto.

Los maltenos están formados por hidrocarburos alifáticos y nafténicos de alto peso molecular y largas cadenas carbonadas, que constituyen aceites de alta viscosidad y, por las denominadas resinas, moléculas complejas sobre núcleos aromáticos que pueden contener oxígeno y azufre en su composición. Los maltenos una vez separados se presentan como líquidos muy viscosos, oscuros y fluorescentes, con densidad menor que uno.

7.2. PROPIEDADES REOLOGICAS DE LOS MATERIALES ASFALTICOS

En el Capítulo 5.1, al referirnos a la estructura de las grasas lubricantes, hablamos de los soles y los geles dentro de los estados coloidales. La transformación isotérmica reversible de sol a gel, por una acción mecánica, se denomina *Tixotropía*, fenómeno que presentan los materiales asfálticos. El comportamiento reológico (9.61) de un sol tiene como límite la curva de fluido newtoniano de la Fig. 6, que en el caso tratado corresponderá a un líquido muy viscoso. El gel se comportará, en el límite opuesto, como un sólido plástico ideal (Fig. 6). El estado de agregación real, como todo fenómeno de la naturaleza, será un estado intermedio entre los límites mencionados, con lo cual las características de flujo de un material asfáltico pueden dar pistas sobre su composición y comportamiento en las aplicaciones prácticas.

Los materiales asfálticos se ablandan con la temperatura, cambian sus condiciones de flujo al aplicarles un esfuerzo cortante, la principal causa de este efecto es el pasaje de estado *gel* a unos 50/60 °C, a estado *sol* a unos 100 °C. Esta modificación en el estado de agregación de las micelas, ruptura de la estructura gel, produce que los asfaltos disminuyan su volumen con el aumento de la temperatura y, además, se comporten como líquidos a las temperaturas de trabajo en las aplicaciones.

Un estudio reológico de los materiales asfálticos requiere ciertas determinaciones de laboratorio como:

- Viscosidad.
- Características del flujo ante un esfuerzo cortante (Fig. 6).
- Variación de la viscosidad con la temperatura.
- Elasticidad.

En 1.3. definimos el concepto de viscosidad:

$$\text{Tensión de corte (S)} = \text{Constante} \times \text{Régimen de corte (R)} ,$$

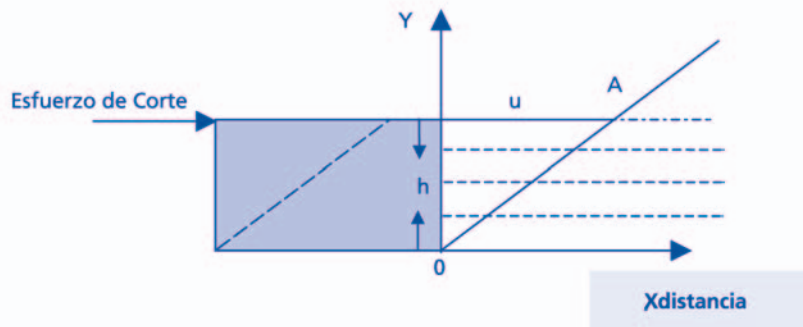
Donde el régimen de corte era *velocidad/h*, resultando para la velocidad:

$$v = du/dt$$

Por lo tanto el Régimen de corte sería:

$$R = (du/dt)/dh, \text{ según la Fig. 64.}$$

Fig. 64- Deformación de un fluido bajo un esfuerzo de corte en un tiempo [t] dado



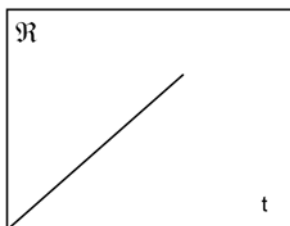
La deformación unitaria, "shear straining", se define como:

$$\mathfrak{R} = du/dh, \text{ tangente del ángulo YoA}$$

Un diagrama permite visualizar distintas propiedades del sistema en estudio, tales como fenómenos tixotrópicos o elásticos. En la práctica se consideran dos aspectos vinculados a los fenómenos reológicos:

- Deformación en función del tiempo a un esfuerzo de corte constante.
- Deformación en función del esfuerzo en un tiempo dado.

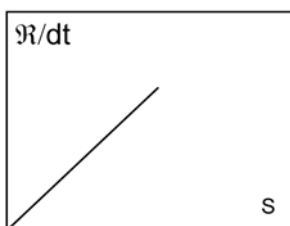
En el primer caso, esfuerzo de corte constante, el diagrama \mathfrak{R} - tiempo puede tomar la forma:



Que nos pone en el caso típico de un líquido newtoniano. Caso donde no hay ningún efecto que aparte al material de la condición de fluido ideal. La representación de la segunda condición, esfuerzo de corte variable, está representada por un diagrama;

$$\mathfrak{R} / dt - S$$

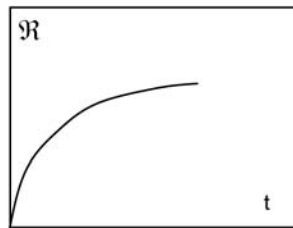
En ambos casos la representación gráfica para líquidos newtonianos pasa por el origen:



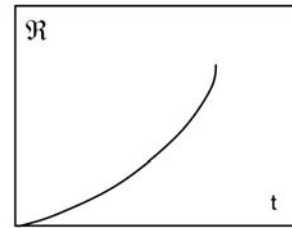
El flujo es viscoso, no presentando ningún efecto elástico o tixotrópico. Como estudiamos en viscosidad, los fluidos pueden ser no-newtonianos, apartándose de la condición ideal de una recta pasando por el origen en cumplimiento de la ley de Newton, . La aparición de fenómenos elásticos o tixotrópicos se reflejan en los diagramas \mathfrak{R} - tiempo según la concavidad de la representación gráfica:

Una curva con la concavidad hacia arriba, que pasa por el origen, demostrando un aumento mayor de la deformación con el tiempo (no-newtoniano), pone de manifiesto la existencia de tixotropía superpuesta al flujo en líquidos.

Una curva con la concavidad hacia abajo, que pasa por el origen, demostrando un aumento menor de la deformación con el tiempo, pone de manifiesto la existencia de fenómenos elásticos superpuestos al flujo. La elasticidad tiende a recuperar la forma, o sea oponerse a la deformación.



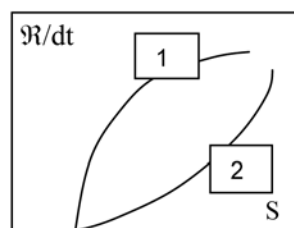
Fluido viscoso no newtoniano tixotrópico



Fluido viscoso no newtoniano elástico

En los diagramas anteriores se han colocado los casos más representativos del comportamiento de los materiales asfálticos. La elasticidad no aparece en forma instantánea al aplicar el esfuerzo, manifestándose como un esfuerzo de signo contrario.

En caso de un plástico, donde la elasticidad se manifestara en forma instantánea, un diagrama $\dot{A}/dt - S$ no pasaría por el origen y al comenzar la deformación fluida, de continuar el comportamiento elástico, daría una curva con la concavidad hacia arriba. Si la fracción fluida del diagrama fuera tixotrópica, la concavidad sería hacia abajo:



Plástico no ideal
1.- Elástico
2.- Tixotrópico

El comportamiento reológico permite hablar de tres tipos de materiales asfálticos(8.59):

TIPO 1: Materiales asfálticos que se comportan aproximadamente como líquidos newtonianos, no hay efecto elástico. Corresponde a materiales no coloidales, o soles muy peptizados, con bajo contenido de asfaltenos y probable contenido de productos de craqueo o crudos muy aromáticos.

TIPO 2: Materiales que se comportan aproximadamente como soles elásticos, o que se encuentran en un grado intermedio *sol-gel*, con curvas $\dot{A} - tiempo$ con la concavidad hacia arriba. Corresponden a materiales provenientes de crudos de base mixta, o con algún grado de oxidación por soplado con aire.

TIPO 3: En este grupo se encuentra los materiales asfálticos correspondientes a plásticos no ideales, con comportamiento elástico, en la parte de flujo, más acentuada que en los del Tipo 2. Para pequeños esfuerzos de corte la recuperación de la deformación es total.

Corresponde a sistemas al estado de gel, con alto contenido de asfaltenos, generalmente productos de alta oxidación por soplado con aire.

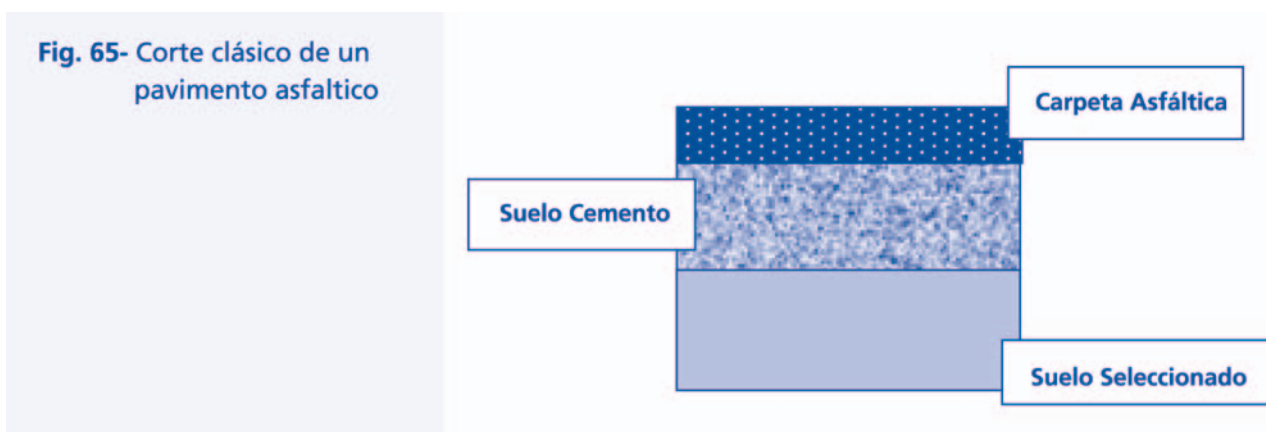
La composición química y concentración de los maltenos y asfaltenos influye sobre las propiedades que permiten tipificar los materiales asfálticos. En forma general se puede decir que un aumento en la aromaticidad de los maltenos, fase líquida ocluida de la emulsión, aumenta su poder peptizante y favorece la formación de soles. Mientras que en el caso de los asfaltenos la disminución de la relación C/H, alta condensación, aumenta el tamaño de las miselas desplazando el equilibrio hacia la gelificación. Ambos efectos se encuentran superpuestos, pudiendo resumir que un aumento en la concentración de asfaltenos, tanto como una disminución de su relación C/H, aumentan las probabilidades de la gelificación. Esta tendencia es contrarrestada por un aumento en la aromaticidad de los maltenos. Un desequilibrio entre estas condiciones puede causar la floculación del sistema coloidal, transformando un material asfáltico estable, homogéneo, en uno *no-homogeneo*, con un "flock" de asfaltenos separados.

Uno de los usos de los materiales bituminosos se plantea en la construcción de caminos, en los denominados *asfaltos de pavimentación*, estos asfaltos la experiencia ha indicado deben ser del *tipo sol*, o próximo a ese estado, para mantener la exigente condición de servicio.

7.3 INTRODUCCIÓN A LA PAVIMENTACIÓN CON ASFALTOS

En términos generales podemos decir que un sistema de pavimentación por asfaltos está conformado según la Fig. 65, donde las dos capas inferiores corresponden a la preparación de la superficie donde se ha de aplicar la denominada carpeta asfáltica. La subbase, o *Suelo Seleccionado*, esta compuesta por tierra seleccionada compactable, de unos 30 a 40 cm de espesor, que debe cumplir con los valores normados para obras de rellenos preparatorios de trabajos de asfaltado.

La base o *suelo cemento* esta formada por tierras aptas, con el agregado de cemento Portland para aportarles alguna rigidez y protección a la acción del agua. El espesor de la base es de unos 10 a 15 cm.



La carpeta asfáltica consiste en una mezcla íntima de agregado mineral; arena de trituración, arena silíceas y piedras, con una granulometría conveniente, más un relleno (filler), con asfalto de especificación adecuada, que cumple la misión de *medio de unión flexible, impermeable y duradero*. El espesor, como otras características generales de la operación de asfaltado no consideradas aquí, depende del tipo de tránsito esperado y de las condiciones locales de suelos y variantes climáticas. En general se puede considerar un espesor medio de

unos 10 ó 15 cm. Normalmente la carpeta asfáltica lleva una capa de unos 10 cm de concreto asfáltico base, más grueso, y una de unos 5cm denominada carpeta de rodamiento(8.60).

El relleno, denominado "filler" en la práctica, esta formado por tierras con características especiales, cuya función específica es reducir los vacíos formados por los áridos y mejorar las condiciones mecánicas de las mezclas asfálticas. Un "filler" de buena calidad debe mejorar la resistencia a los agentes climáticos, aumentar la durabilidad del ligante, rechazar el agua y mejorar la adherencia *asfalto - agregados*.

El conocimiento de la composición de los asfaltos, como su principal uso; *construcción de carreteras*, permite estudiar los más comunes métodos de análisis y ensayos a los efectos de evaluar las especificaciones, o sea las condiciones para el mejor cumplimiento de sus funciones. Es de destacar que los asfaltos para carreteras también reciben el nombre de *cementos asfálticos*.

7.4.- METODOS DE ANALISIS DE ASFALTOS

Los métodos de análisis para materiales bituminosos se encuentran en el *ASTM, Sección 4, Construcción* (1999), Volúmenes 04.03 y 04.04. En lo que respecta a especificaciones la norma a consultar es la ASTM 03381-92(TABLA 44).

En el IRAM (Instituto Argentino de Racionalización de Materiales), las especificaciones o características de los asfaltos de mercado se encuentran en la Norma IRAM 6604 (TABLA 45.).



TABLA 44 ESPECIFICACIONES ASTM D 3381-92 PARA ASFALTOS(8.62)
(Resumida)

ASFALTOS, GRADO	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad a 60°C, Poises	250± 50	500± 100	1000± 200	2000± 400	3000± 600	4000± 800
Viscosidad a 135°C, cSt, Min.	125	175	250	300	350	400
Penetración a 25°C(100g-5s)	220	140	80	60	50	40

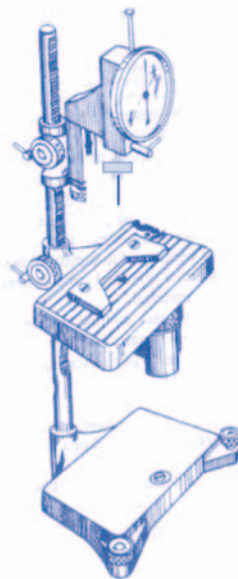
TABLA 45 ESPECIFICACIÓN IRAM 6604 PARA ASFALTOS(8.62)
(Resumida)

TIPO Características	I		II		III		IV		V	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Penetración 25°C, 100g, 5s.	40	50	50	60	70	100	150	200	200	300
Densidad Relativa 25°C/25°C	0,99		0,99		0,99		0,98		0,98	
Ductilidad 25°C 5 cm/min, cm	100		100		100		100		100	

7.4.1. ENSAYO DE PENETRACIÓN, IRAM 6576, ASTM D5

Las determinaciones de laboratorio para determinar las condiciones reológicas de un material bituminoso o de un *Asfalto para Carretera*, requieren de equipamiento especializado, personal idóneo y consumen un tiempo considerable. Las técnicas desarrolladas durante tantos años de investigación en los sistemas multicomponentes del petróleo, han permitido obtener métodos empíricos, que dan suficiente información para las aplicaciones prácticas. El Ensayo de penetración se conoce desde 1889(8.58)

**Fig. 66- Penetrómetro
ASTM D-5**

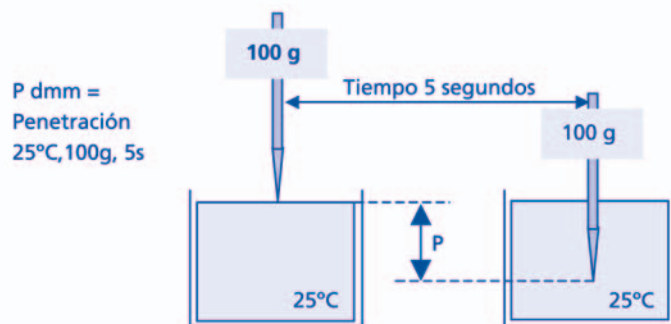


La *Penetración* es un ejemplo clásico de método empírico, que da una medida de la consistencia de un asfalto con un simple aparato como el de la Fig. 66.

La *Penetración* se expresa como la *distancia en décimas de milímetro*, que una aguja estándar en un equipo estándar penetra en el asfalto a 25°C, en 5 segundos bajo un peso de 100 gramos. El peso comprende todas las partes móviles, incluida la aguja, que se apoyan sobre el punto de la superficie del asfalto que toca la aguja al comenzar el ensayo. El ensayo de penetración no guarda relación con la calidad de un material asfáltico, sin embargo los distintos grados de las distintas durezas para cada aplicación, son indicadas con los números de este ensayo.

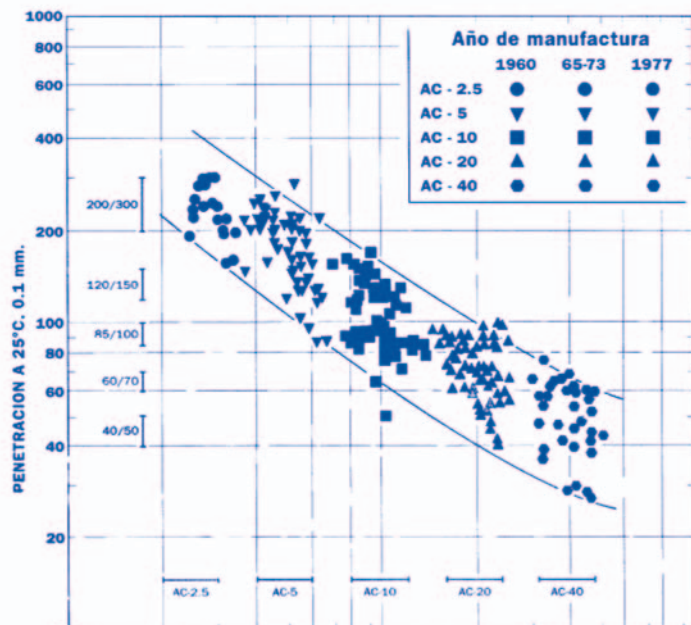
Los números de la Penetración son inversos al aumento de la dureza (la aguja penetra menos Fig. 67), Si la guja penetra menos de 40 dmm en los 5 segundos del ensayo, al asfalto se los considera sólido. Con más de 230 dmm los asfaltos son líquidos, resultando los comprendidos en las especificaciones semi-sólidos.

Fig. 67- Ensayo de Penetración



Para los materiales viscosos puros, newtonianos, la consistencia medida por la penetración sería proporcional a la viscosidad. Sin embargo el ensayo tiene severas limitaciones en las interpretaciones teóricas como ser; a medida que penetra la aguja disminuye el esfuerzo de corte por aumento de la superficie de contacto metal-asfalto, el asfalto se adhiere con distinta fuerza según su calidad a la guja, retardado su recorrido. Estas limitaciones, y otras no mencionadas, hacen que no haya una *correlación* entre la viscosidades y las penetraciones. En la Fig. 68 tomada de la bibliografía (8.62), donde se menciona la bibliografía (8.63), se muestra una gráfica con el campo de variación de la relación *viscosidad – penetración*.

Fig. 68- Relación Penetración - Viscosidad



La concordancia *viscosidad – penetración* se desmejora con respecto a la teórica a medida que el asfalto se aleja del comportamiento newtoniano, dada la complejidad del flujo en esos casos. Las viscosidades se practican en laboratorio por los métodos ASTM D-2170 ó ASTM D-2171.

7.4.2. ENSAYO DE DUCTILIDAD, ASTM D-113, IRAM 6579

La *Ductilidad* es un ensayo de resistencia a la tracción, midiéndose por la distancia a la cual se estiran sin romperse probetas de material asfáltico, a una temperatura y con una velocidad determinadas. El *ductilómetro*, realiza el ensayo a 25°C y con una velocidad de $5 \pm 0,25$ cm/min.

La ductilidad tiende a ser una medida de la capacidad de mantenerse como aglomerante cuando el asfalto es sometido a deformaciones por tracción.

La tensión aplicada durante el ensayo, fuerza por unidad de superficie, es variable como resultado del adelgazamiento del hilo formado. En el momento que la tensión se hace mayor que la cohesión del asfalto la probeta se corta.

De acuerdo a la bibliografía consultada la ductilidad es un ensayo discutible en cuanto su capacidad de evaluar la consistencia, incluso algunos autores le asignan valor para medir las propiedades ligantes y adherentes con respecto a los agregados, asunto refutado por otros.

Considerando la propia experiencia e interpretación, se puede decir:

La alta ductilidad corresponde a los materiales asfálticos blandos, del tipo viscosos elásticos, Tipo II, cuyos valores tenderán a aumentar cuanto más cerca del estado gel puro se encuentren.

Las bajas ductilidades se dan en los materiales duros, disminuyendo a medida que se acercan a la condición de sol. El aumento de la concentración de asfaltenos, como el aumento de la condensación de estos, disminuyen la ductilidad.

Los materiales de alta ductilidad han demostrado en general mejores condiciones ligantes y de adherencia que los de baja ductilidad.

7.4.3. OTROS ENSAYOS DE USO COMÚN

Los asfaltos son materiales termo sensibles, disminuyen la viscosidad y la penetración con la temperatura. Esta propiedad es de una importancia capital durante el uso, dado que permite las mezclas con los agregados pétreos y su aplicación en el terreno. Es de destacar que la temperatura de trabajo debe ser lo más baja posible para evitar modificaciones en el delicado equilibrio del sistema. En el caso de las mezclas con los pétreos sería conveniente un asfalto de alta sensibilidad a la temperatura. Durante el servicio las condiciones optimas se invierten, sería aconsejable baja sensibilidad a las temperaturas de servicio (ambientes en el lugar), a los efectos de no volver quebradiza la capa asfáltica en épocas frías por alta dureza o demasiado blandas con el calor.

Uno de los ensayos que permite ir conociendo las propiedades termo sensibles de los asfaltos es el *Punto de Abrandamiento*, también conocido como de *anillo y esfera*. La técnica en resumen consiste en medir la temperatura a la cual una esfera de acero penetra un disco del material asfáltico colocado en un anillo, bajo condiciones estándar (IRAM). Los asfaltos no presentan punto de fusión, sino que cambian la consistencia gradualmente con la

temperatura, por lo tanto la determinación resulta en un número arbitrario y no expresa un cambio en el estado físico del sistema.

Si se consideran los asfaltos del Tipo I, viscosos newtonianos, la variación de la viscosidad define la sensibilidad a la temperatura de un material. En los del Tipo II y III, donde los factores reológicos influyen sobre la viscosidad, se hacen necesarios métodos empíricos basados en ensayos de rutina para establecer dicha sensibilidad.

En 1936 Pfeiffer y van Doormaal (8.63) propusieron un índice, conocido como Índice de penetración (I_p), basado en las determinaciones de penetración y punto de ablandamiento. La variación de la penetración (P) con la temperatura (t) es una función exponencial, al igual que la viscosidad, si bien aumenta con la temperatura:

$$\log P = at + b$$

Los autores encontraron por extrapolación de la ecuación anterior que, a la temperatura del punto de ablandamiento, todos los asfaltos tienen aproximadamente un penetración de 800:

$$\begin{aligned} \log P_{25} &= a \cdot 25 + b \\ \log 800 &= a \cdot t_a + b, \quad \text{donde } t_a = \text{Temp. Punto Abland.} \end{aligned}$$

$$\text{Log } (800/P_{25}) = a(t_a - 25)$$

A la constante a Pfeiffer y van Doormaal la relacionan con un índice que llaman Índice de Penetración:

$$a = (20 - I_p/10 + I_p) (1/50)$$

Luego:

$$\begin{aligned} (\log (800/P_{25}) / (t_a - 25)) 50 &= (20 - I_p) / (10 + I_p) \\ f &= (20 - I_p) / (10 + I_p) \end{aligned}$$

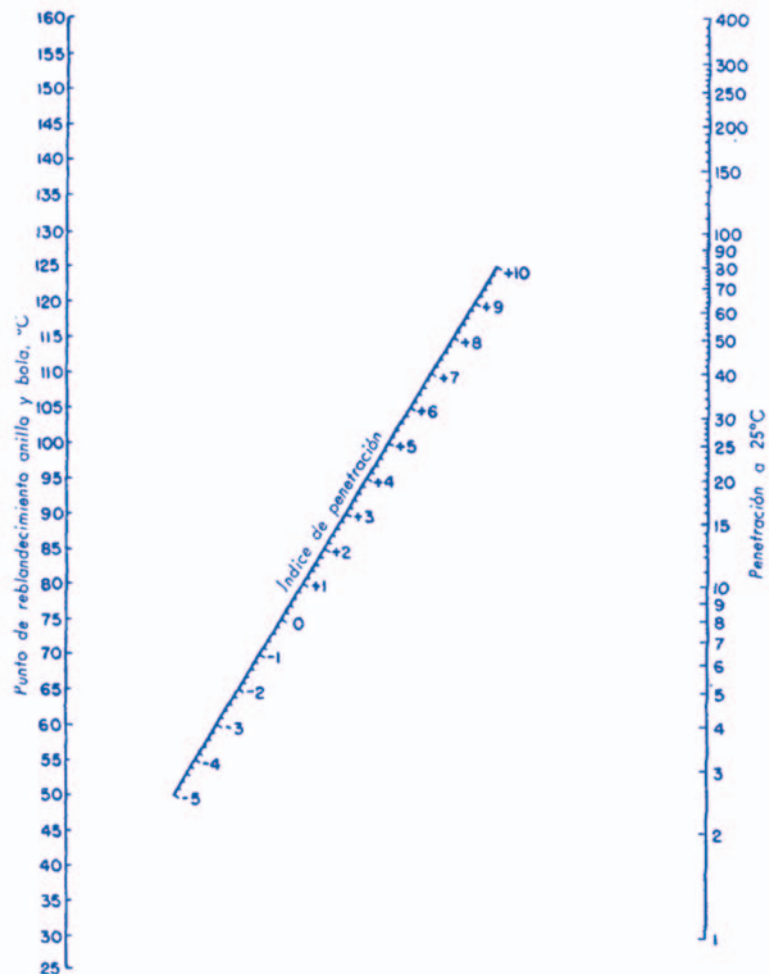
De acuerdo a la experiencia e interpretación de los autores mencionados, el factor f es una función del *punto de ablandamiento* y de la *penetración*, operando:

$$I_p = (20 - 10f) / (1 + f)$$

El nomograma de la Fig. 69 permite estimar el *Índice de Penetración*, resultando valores que varían entre -5 y $+10$, aunque en realidad la mayoría de los asfaltos están entre unos $-2,5$ y 7 . La interpretación del I_p , con respecto a las condiciones reológicas de los materiales en ensayo se puede definir como:

Tipo I,	$I_p < -2$
Tipo II	$-2 < I_p < +2$
Tipo III	$I_p > +2$

Fig. 69- Índice de Penetración



El *Peso Específico* de los asfaltos ronda el valor uno, siendo menor para los del Tipo I, aumentando a medida que nos desplazamos hacia tipos superiores, llegando a ser superiores a uno. Los materiales asfálticos se despachan por peso, en caliente, para mantenerlos fluidos, tomando la consistencia de sólidos cuando se enfrían. Por esta razón la *densidad* o *el peso específico* se realizan generalmente por pesada y midiendo el volumen de líquido (agua) que desplaza el sólido que fue pesado.

Durante el mezclado del asfalto con los áridos e, inclusive durante el extendido de las carpetas, se produce evaporación de livianos y procesos de oxidación favorecidos por la temperatura y la agitación, que aumentan la consistencia del material. Existe un método para medir la posible afectación por estos factores, denominado *Ensayo de Película Delgada*. Utilizando un Método ASTM (D-1754), el espesor de la película para el ensayo es de 21 mm, si se utiliza la Norma IRAM (6604), es de 3 mm. En los dos casos el material en ensayo extendido en forma de película, se calienta durante 5 h a 163°C, midiéndose posteriormente la penetración, denominada *retenida* y expresada en % de la original, la ductilidad y las pérdidas en volumen que causa el ensayo. En la TABLA 46 se muestra valores típicos tomados de las calidades ofrecidas en el mercado nacional.

TABLA 46 VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE UN ASFALTO POR APLICACIÓN DEL ENSAYO DE PELÍCULA DELGADA

Calidad del cemento asfáltico	Asfalto 70/100	
	Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C (100g, 5s), dmm	70	100
Ductilidad a 25°C, (5 cm/min.), cm	100	-
Ensayo de Película Delgada (IRAM)		
Penetración retenida, % del original	50	
Ductilidad luego del ensayo PD	75	
Pérdida por calentamiento, %		1

Los hidrocarburos en general y los betunes asfálticos en particular son sensibles a la temperatura. Un aumento puntual a unos 300 °C o un tiempo prolongado a unos 200°C, puede provocar craqueo o rotura molecular por temperatura, afectándose principalmente las cadenas parafínicas unidas a núcleos aromáticos condensados. Estas reacciones químicas aumentan la instauración de los asfaltenos, sumando dobles ligaduras no vinculadas a bencenos, que son sumamente reactivas, provocando polimerizaciones que aumentan la relación C/H.

En 7.1 se habló de la *presión interna* en la solubilidad de un sólido no polar en un líquido de la misma clase, esta presión interna aumenta con el aumento de la aromaticidad, permitiendo por variaciones en la calidad de un solvente, seleccionar aquellos que no solubilizan materiales craqueados. Esta propiedad se utiliza para detectar en los asfaltos productos de descomposición térmica, ya se hayan formado por sobrecalentamiento o por agregado de productos de procesos de craqueo térmico.

El *ensayo denominado Oliensis*, en honor a quien lo propuso, normalizado en el Método IRAM 6594, disuelve el asfalto en un solvente (mezcla de hidrocarburos con xileno) especialmente preparado para *no solubilizar micelas craqueadas*. Procediéndose a continuación a tomar una gota de la mezcla del asfalto con el solvente y colocarla en un papel tipo filtro de laboratorio. Si todo el asfalto se ha disuelto en el solvente, no hay productos de craqueo, la mancha es homogénea. Si aparece una mancha más oscura en el centro, parte del asfalto no se solubilizó, indicando presencia de productos de descomposición térmica.

7.5. LOS ASFALTOS EN LA TÉCNICA VIAL

Los asfaltos utilizados en construcción de caminos, o pavimentación, tienen una penetración entre unas 40 a 250 unidades (Tabla 45), por lo que se los considera semi-sólidos a temperatura ambiente. Esta condición física hace necesario disminuir su consistencia durante la aplicación práctica. La forma de disminuir la consistencia da nombre a tres distintas formas de presentación de los asfaltos para carreteras:

Cementos Asfálticos: Durante la aplicación se disminuye la consistencia por aplicación de calor, con temperaturas de aplicación superiores a 100°C.

Asfaltos Diluidos: Materiales fluidificados por el agregado de solventes de petróleo.

Emulsiones Asfálticas: Dispersión de un asfalto en agua mediante el agregado de un agente emulsionante.

En términos generales podemos decir que la aplicación de los *cementos asfálticos*

permiten librar al uso más rápido las carreteras, ya que no necesitan el *tiempo de curado* de los asfaltos diluidos o emulsionados. Como *tiempo de curado* se conoce al proceso durante el cual, por evaporación del solvente o el agua, se desarrolla tanto el endurecimiento como las propiedades ligantes del asfalto. Los cementos tienen un mayor costo de aplicación por requerir mayores instalaciones para calentamiento y mezclado, por lo cual en *ciertas tareas* como bacheo o aplicación de capas superficiales puede resultar conveniente otro tipo de asfalto.

Las propiedades más importantes a considerar en las aplicaciones de los cementos asfálticos son:

- Durabilidad de la aplicación
- Adherencia con el agregado
- Susceptibilidad a la temperatura

Agregándose en el caso de los diluidos o emulsionados:

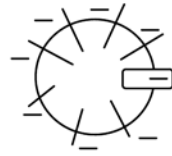
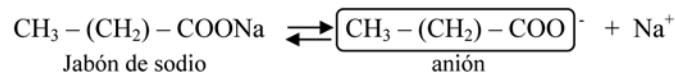
Características de curado

Los asfaltos diluidos se fabrican en tres tipos, denominados en nuestro país como de Endurecimiento Rápido (ER), Medio (EM) y Lento (EL). Esta clasificación está vinculada a la volatilidad del solvente, que el caso del de *rápida evaporación* tiene las características de una nafta pesada (unos 150 – 250 °C), *media* tiende a un queroseno y *lenta* a un gas oil. Dentro de cada clase existen rangos o grados, vinculados a la proporción de solvente agregado (ER₁, ER₂, etc.).

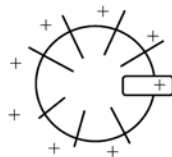
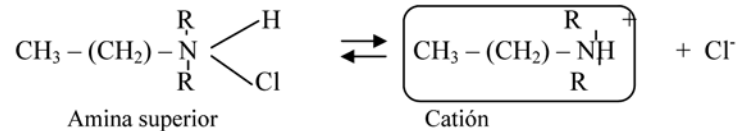
Los usos comunes de cada categoría de asfalto diluido están relacionados con cada aplicación, por ejemplo, para carpetas que se compactarán en unas 24 a 72 horas para librarse al tránsito en unas 24 o 72 horas después, se usarán los ER. Si se busca compactar bases de áridos colocados previamente, se usarán EM, para que penetren antes de aumentar la viscosidad y dejar huecos en las bases. En el caso de los EL, resultan de utilidad cuando es necesario incorporar polvos o algún material pétreo a la superficie de la carpeta, ya que mantiene una baja viscosidad por más tiempo, por supuesto que el tiempo de curado será lento y el uso postergado hasta que tengan una dureza apropiada.

En lo que respecta a las emulsiones asfálticas las mismas corresponden a sistemas que están próximos a los coloides, o sea sistemas dispersos formados por dos líquidos no miscibles entre sí, *asfalto en agua*. En este caso el dispersante es *polar*, agua, mientras que la fase dispersa es *no polar*, asfalto, denominándose en general emulsiones OW (Oil/water). La estabilidad de la emulsión requiere de un *emulsionante*, una gran molécula con características especiales, con un grupo oleofílico, una cadena carbonada larga y otro hidrofílico, un grupo ácido de un ácido graso saponificado, denominados tenso-activos.

Cuando se produce por medios mecánicos la dispersión del asfalto en el agua, en forma de gotas de aproximadamente un micrón de diámetro, el tenso-activo se ubica en las superficies de separación agua – asfalto, disolviéndose su parte oleofílica en el asfalto. Este efecto estabiliza los glóbulos de hidrocarburos impidiendo, o retardando, que se produzca la coagulación, por cargarlos con electricidad del mismo signo que se repelen. Las emulsiones pueden ser alcalinas o ácidas, según se utilice como emulsionante un jabón alcalino de un ácido graso o una amina superior:



Emulsión alcalina o ANIONICA



Emulsión ácida o CATIONICA

Durante el curado de las aplicaciones de los asfaltos emulsionados se produce la lenta evaporación del agua, originalmente en concentración de unos 40 – 50%, hasta que llega a una concentración (5-10%) donde se produce la coagulación de la fase dispersa, invirtiéndose en ese momento la emulsión que pasa a ser W/O (agua emulsionada en aceite). Una vez que se produce la inversión, las propiedades ligantes del sistema permiten, a pesar del agua remanente, liberar al tránsito la carpeta. El uso eliminará la totalidad del agua, llegando en ese momento a la máxima estabilidad del sistema. Hasta llegar al máximo de estabilidad la carpeta puede ser afectada por lluvias, dado que existe la posibilidad de *re-emulsionarse*. La utilización de emulsiones catiónicas o aniónicas, depende de la carga eléctrica superficial residual de los materiales utilizados como agregados. Por ejemplo los materiales calcáreos, con tendencia a cargarse positivamente, son mejor aglomerados por emulsiones aniónicas.

Las propiedades de los asfaltos base pueden ser modificadas por soplado con aire de los mismos, dando origen a los conocidos como *asfaltos soplados*. Las reacciones propias de la oxidación de los hidrocarburos, a 200 – 300°C, con tiempos de hasta unas 12 horas, produce principalmente deshidrogenación y polimerización. Como resultado de estas reacciones y otras relacionadas, los materiales bituminosos se desplazan hacia mayores temperaturas de ablandamiento y menores penetraciones.

8. BIBLIOGRAFIA

- 1.- Edmister – "Petroleum Refiner" - Gulf Publishing Co, 1949
- 2.- Maxwell - "Data book on hydrocarbons" - Editortial D.Van Nostrand CO, 1950
- 3.- Martinez de Vedia R. - "Motores Térmicos" - Editorial Reverte, 1957
- 4.- Nelson W.L. –"Refinación de Petróleos" - Editorial Reverte, 1958
- 5.- Hengstebeck R.J. – "Petroleum Processing" -Editorial McGraw-Hill, 1959
- 6.- Schmidt Fritz A.F. - "Máquinas de combustión" (Motores y turbinas de gas) –Editorial Labor, 1960
- 7.- I.P.Londres - "Moderna Tecnología del Petróleo" - Editorial Reverte, 1963
- 8.- Bland F.W., Davidson R.L. – "Petroleum Processing Handbook" - Editorial Mcgraw Hill, 1967
- 9.- Petreco Division, Petrolite Corporation – "Impurities in Petroleum", 1968
- 10.- Martinez de Vedia R. – "Teoría de los Motores Térmicos, Conversión de la Energía" – Editorial Alsina, 1979
- 11.- International Petroleum Encyclopedia - Penn Well Publishing Company, 1982
- 12.- Martinez de Vedia R. - "Teoría de los Motores Térmicos, Turbinas de Gas" - Editorial Alsina, 1983
- 13.- Drabkin A.E., Proskuriakov V.A. - "Química del Petróleo y del gas" - Editorial MIR, 1984
- 14.- Giacosa Dante -"Motores Endotérmicos" -Editorial Omega, 1988
- 15.- Erij V., Rásina M., Rudin M. - "Química y tecnología del Petróleo y del Gas" - Editorial MIR, 1988
- 16.- Delgado Puche J., Lopez de Miguel F. - "Los Productos Petrolíferos. Su Tecnología" – Editorial G.T.S. Madrid, 1988
- 17.- Martinez de Vedia R.- "Teoría de los Motores Térmicos, Dinámica de Gases" - Editorial Alsina, 1989
- 18.- De Castro M. - "El motor Diesel en el Automóvil" - Editortial CEAC, 1992
- 19.- De Castro M. - "Manual del Turbo" - Editorial CEAC, 1993
- 20.- Gualtieri P.J.- "Turbo Compresores" - Editorial Cosmopolita, 1995
- 21.- Alonso J.M. - "Tecnologías Avanzadas del Automotor" – Editorial Paraninfo, 1995
- 22.- Peters Max S., Timmerhaus Klaus D. – "Plant desing and Economics for Chemical Engineers" – McGraw – Hill Kogakusha, Ltda. 1968
- 23.- Krenkel, Naon, Sierra – "Evaluación de Proyectos de Plantas Químicas" – Asociación Química Argentina. 1969
- 24.- Matar Sami, Hatch Lewis S. – "Chemistry of Petrochemical Processes" – Gulf Publishing Co. 1994
- 25.- Germain J. E: - "Conversión Catalítica de Hidrocarburos" – Editorial Trillas 1980
- 26.- Adams Orville – "Motores Diesel" – Editorial Gustavo Gili, S.A., 1980
- 27.- Gould Edwin S. – "Mecanismos y Estructuras en Química Orgánica" – Editorial Kapelus 1967
- 28.- American Society for Testing Materials "Annual Book of ASTM Standards" 1999
- 29.- Gary James H, Handwerk E., "Petroleum Refining" – Marcel Dekker, Inc. 1994
- 30.- Rikles Bernardo – "Tablas de Conversión".- Yacimientos Petrolíferos Fiscales, 1980
- 31.- A.P.I. –"Technical Data Book", 1963
- 32.- Garcia E Y, Löffler D G – "El Gas Natural" – Edigem S. A. 1984
- 33.- Hougen y Watson – "Chemical process Principles, Vol I" – John Wiley & Son, 1943
- 34.- Perry John H.- "Manual del Ingeniero Químico" – UTEHA, 1958
- 35.- Hodgman Charles D. – "Handbook of Chemistry and Physics".- Chemical Rubber Publishing Co, 1947
- 36.- Watson y Gamson – "Thermodynamics of the Liquid State" – Ind. End. Chem., 1943
- 37.- Watson y Gamson – "Vapor Presures and Critical Propertie" – Nat. Pet. News, Tech.

- Sect., May 3, 1944
- 38.- Hougén y Watson – “Chemical Process Principles” - John Wiley & Sons, 1945
 - 39.- Villanueva M. R. – “Calderas Marinas” – Escuela Naval Militar, 1950
 - 40.- Alonso J. M. – “Sistemas Auxiliares del Motor” – Editorial Paraninfo, 1995
 - 41.- Cerutti A. A., Gogni R, Alonso R, Merli O, “Control de Calidad” - C.A.C.Y.P.F.,
Cámara Argentina de Agentes y Consignatarios de YPF, N° 29 Setiembre 1974.
 - 42.- Hitec 3000 Performance Additive, Ethyl Petroleum Additive, 1996
 - 43.- “Diesel Engine Fuel Specification”, compiled by Ethyl Corporation, Detroit, Michigan,
August 1967
 - 44.- Adams Orville, “Motores diesel” – Gustavo Gili S.A. Barcelona 1980.
 - 45.- Cerutti A. A., Jarosz R, “En sociedad por un crecimiento sustentable”, Énfasis,
año 5/N°8/Diciembre 1998
 - 46.- Bustamante Alsina J.- “Derecho ambiental” – Abeledo Perrot, 1995
 - 47.- Cerutti A.A., “Procedimientos Para los Residuos Industriales” – Apuntes Curso de
Capacitación Instituto Argentino del Petróleo y el Gas, 1999
 - 48.- Metcalf Eddi, “Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales” – Labor 1977
 - 49.- Leighton P.A., “Photochemistry of Air Pollution” – Ed. Eric Hutchinson and P Van
Rysselbergue, Vol. XI, New York: Academic Press, 1961.
 - 50.- Ivanovich David, “Fuel additive uproar could hurt Gulf Coast” – Houston Chronicle,
EEUU. Sunday, June 13 1999.
 - 51.- Moodi L.F., “Friction Factor for Pipe Flow”, Trans ASME, noviembre 1944.
 - 52.- Shingley J. E., Mischke C. R, “Bearings & Lubrication” – McGraw-Hill Pu. Co. 1990
 - 53.- Sturla A, Castellano E, “Metalografía Microscópica”, Librería y Editorial Alsina, 1951
 - 54.- SKF, “Manual de Mantenimiento de Rodamientos”, Publicación 4100 SP, SKF 1992
 - 55.- Benlloch María J, “Los Lubricantes”, Ediciones CEAC S.A. España 1990.
 - 56.- Hersey Dyer Mayo, “Teoría de la lubricación” Editorial El Ateneo, Buenos Aires 1947
 - 57.- Pérez Parra D, “Lubricantes su empleo y selección”, Ediciones CEAC, España 1963
 - 58.- Petroni Eberto, “Materiales Asfálticos para Caminos”, Facultad de Ingeniería UBA.
 - 59.- Pfeiffer J. Ph. “The Properties of Asphaltic Bitumen”, Ámsterdam, Elsevier Publishing Co.
Inc, 1950
 - 60.- Comisión de Refinación del Instituto Argentino del Petróleo, Comisión permanente del
Asfalto, Coordinación Dr. Agnusdei J, “Estudio de Laboratorio y en Tramo Experimental
de Asfaltos para Pavimentación de Origen Nacional”, Publicación de la Comisión
Permanente del Asfalto, XIX Reunión del Asfalto 1975. (El autor, Cerutti A.A., formaba
parte de la Comisión de Refinación del IAP).
 - 61.- Pinilla A., Agnusdei J.O., “Reología de Asfaltos Argentinos con el empleo del micro
viscosímetro, I y II Parte”. XIII Reunión del Asfalto 84. 1964
 - 62.- Refinería San Lorenzo, SL, “Asfaltos Viales” Servicio de Atención al Cliente
 - 63.- Pfeiffer J. Ph, van Doormaal P.H., J. Inst. Petrol. Tech. 22, 414, 1936

