UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Engenharia Mecânica
Laboratório de Máquinas Ferramentas

TRIBOLOGIA
II - LUBRIFICANTES
III - REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

B. de M. Purquério

São Carlos, fevereiro de 1998
Reimpressão

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS

TRIBOLOGIA

II - LUBRIFICANTES

B. de M. Purquerio
M.Sc.(Tribologia), Ph.D.

SÃO CARLOS
1983

II - LUBRIFICANTES

1 - INTRODUÇÃO

Entende-se por lubrificação, a redução da re - sistência ao atrito e desgaste ou outras formas de deterioração superficial entre duas superfícies pela aplicação de um lubrificante .

Todo objeto que desliga ou rola sobre um outro gera atrito. A menos que um lubrificante sólido, líquido ou gasoso seja colocado entre as superfícies para mantê-las separadas e permití-las de deslizar ou rolar com um mínimo esforço, o atrito causará, no final, a destruição dos objetos. Portanto, um lubrificante é toda substância interposta entre duas superfícies em movimento relativo com o propósito de reduzir o atrito ou o desgaste entre elas, bem como em muitos casos, protê-las e refrigerá-las.

Na natureza a estrutura dos animais é consti - tuída de muitas juntas que são tão perfeitas mecanicamente e tão bem lubrificadas com um lubrificante tão perfeito que elas operam durante uma vida inteira com uma eficiência que nunca sequer foi aproximada pelos mecanismos feitos pelo homem. Isto é devido a adequação do lubrificante utilizado o qual é mantido puro, não sendo permitida a sua contaminação . A natureza fornece o lubrificante graxo necessário para prevenir o ressecamento dos pêlos dos animais evitando assim a quebra e desgaste dos mesmos. A natureza também, não usa o lubrificante das pálpebras para outras partes do organismo.Sabiamente ela seleciona e propriamente aplica aquilo que é adequado para cada condição de uso.

Nas máquinas constituídas de componentes que se movem em contato relativo, a lubrificação é uma necessidade; pois de outra forma, a operação das mesmas não poderia continuar sem a destruição das partes. O grau de lubrificação necessário depende unicamente do grau de desenvolvimento da máquina.

2 - CLASSES DE LUBRIFICANTES E REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

Os lubrificantes dividem-se em quatro principais classes: sólidos, semi-sólidos, líquidos e gasosos. Os vários materiais para mancais sêcos, sólidos como o grafite e o bissulfeto de molibdênio (M_oS_2) constituem a primeira classe. A segunda classe é composta principalmente das graxas, as quais são feitas de uma combinação de gorduras e óleos engrossadas com sabões de cálcio ou sódio. A terceira classe consiste da grande variedade de óleos derivados dos reinos animal, vegetal ou mineral, além dos sintéticos. Finalmente, a quarta classe é constituída principalmente de ar ou hélio, embora outros gases também sejam utilizados. As principais classes de lubrificantes é mostrado no quadro abaixo.

- Principais classes de lubrificantes
  - Sólido
    - Grafite, M_oS_2
    - Materiais para mancais sêcos
  - Semi-sólido
    - Graxas
  - Líquido
    - Animal
    - Vegetal
    - Mineral, a base de petróleo
      - Sem aditivos
      - Com aditivos
      - e.g. pressão extrema (PE)
    - Sintéticos
      - Lubrificantes para temperaturas alta e/ou baixa
      - Lubrificantes resistentes ao fogo
  - Gasoso
    - Ar
    - Hélio

Existem dois principais tipos de lubrificação: com filme de fluido e limite. Uma condição intermediária entre esses dois tipos é conhecida como lubrificação mista e uma outra forma especial de lubrificação com filme de fluido na qual a deformação elástica dos componentes contribui para o mecanismo de lubrificação é conhecida como lubrificação elastohidrodinâmica.

A Tabela 2.1 mostra as características desses dois principais tipos de lubrificação:

Tipo de Lubrificação	Exemplos	Características	Fatores da Lubrificação
Hidrodinâmica	Mancais de escorregamento	Baixo atrito e desgaste. Películas espêssas.	Viscosidade. Variação da viscosidade com a temperatura.
Elastohidrodinâmica	Engrenagens Cames	Baixo atrito e desgaste. Películas finas.	Viscosidade. Variação da viscosidade com a temperatura e pressão.
Limite e Pressão Extrema (PE)	Cargas muito pesadas. Velocidade de escorregamento muito alta.	Alto e moderado atrito e desgaste. Algum contato metálico.	A viscosidade não é importante. Aditivos PE e anti desgaste são necessários.
Lubrificação sêca	Lubrificantes sólidos com metais convencionais para mancais. Materiais para mancais sêcos.	———	———

Tabela 2.1 - Os principais regimes de lubrificação.

3 - ÓLEOS LUBRIFICANTES

3.1 - Hidrocarbonetos

Os componentes básicos dos óleos lubrificantes são os hidrocarbonetos-compostos de carbono e hidrogênio. O enxofre também ocorre em quantidades pequenas em alguns compostos.

Mesmo da mais volátil fração do petróleo como a gasolina, hidrocarbonetos simples podem ser separados como por exemplo:

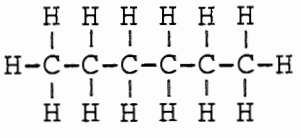
a parafina : cadeia reta (n—), cadeia ramificada (n—), cadeia cíclica.

os aromáticos: compostos insaturados

Exemplo:

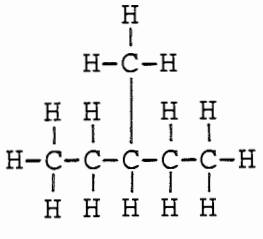
a) parafinas

n-hexano C_6H_{14}

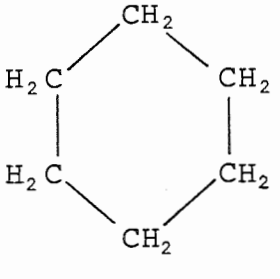


A distância entre carbonos é 1,54 Å ($1Å=10^{-8}cm$)

iso-hexano C_6H_{14}

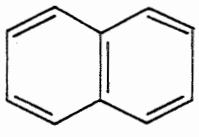


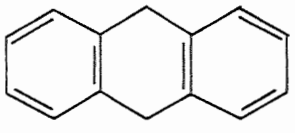
ciclo-hexano (naftenos) C_6H_{12}

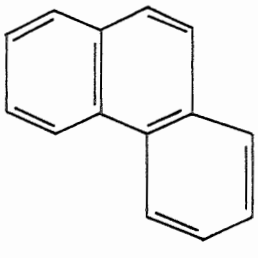


b) aromáticos

benzeno C_6H_6 (monoaromático)

naftaleno $C_{10}H_8$  (diaromático)

autraceno $C_{14}H_{10}$ 

fenantraceno 

(triaromáticos)

3.2 - Óleo Crú

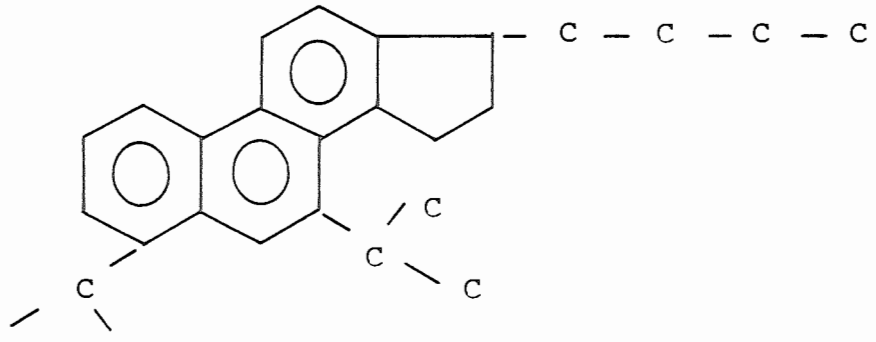
Os óleos crús variam desde líquidos de cor âmbar até semi-sólidos de cor preta, com constituintes evaporando desde temperaturas bem abaixo da ambiente, até mais que 500°C. A faixa dos pesos moleculares dos hidrocarbonetos varia entre 16 a 1000. Históricamente os derivados dos óleos crús eram classificados como Parafínicos - contendo largas quantidades de parafina nos constituintes de evaporação alta, ou Naftênicos - contendo pouca parafina mas muito material asfáltico. A maioria dos crús, contudo, contém ambos os componentes e são chamados de Base Mista.

As principais frações de um óleo crú são: gás e hidrocarbonetos gasosos contendo 1 a 4 átomos de carbono, gasolina, querosene, óleos para gás e óleos diesel e lubrificantes.

3.3 - Propriedades dos Hidrocarbonetos nas Frações dos Óleos Lubrificantes

Os óleos lubrificantes obtidos dos óleos crús contém um grande número de hidrocarbonetos os quais

são complexos em caráter e frequentemente possuem ambas as propriedades parafínicas e aromáticas. Uma molécula típica de óleo pode ser como segue:



O efeito da estrutura de um hidrocarboneto nas suas propriedades físicas é ilustrado na série de hidrocarbonetos ilustrados na Tabela 3.1 onde todos tem o mesmo peso molecular, mas a estrutura muda progressivamente de puramente parafínico para naftênico.

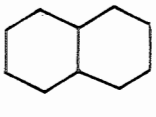
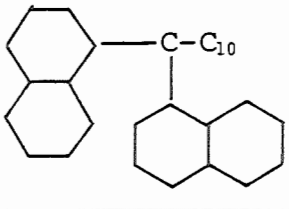
Hidrocarbonetos	Viscosidade [cSt]		Índice de Viscosidade	Densidade a 20°C	Ponto de Solidificação [°C]
	40°C	100°C			
$C_{31}H_{64}$	Sólido	—	—	0.780	65
$C_{10}-C-C_{10}$ C_{10}	15,1	3,7	149	0.812	9
$C_{10}-C-C_{10}$ | 	45,7	6,4	95	0.87	-40°C
	866	20.3	-96	0.934	Ponto de gôta: -1

Tabela 3.1 - Propriedades dos hidrocarbonetos puros na faixa de óleos lubrificantes.

Pode ser visto pela tabela 3.1 que o carater naftênico da molécula aumenta a viscosidade e a densidade ao passo que o ponto de solidificação diminui. A viscosidade também aumenta com a temperatura.

Moléculas de complexidade maior e muito maior viscosidade são encontradas nas frações de óleos lubrificantes com o mais elevado ponto de evaporação. A presença de complexos aromáticos também decrescem a estabilidade à oxidação de um óleo.

3.4 - O Refinamento de Óleos Lubrificantes

Os dois requisitos mais importantes para os óleos lubrificantes são:

a) Que exista uma faixa larga de graus de viscosidade;

b) Que o óleo retenha suas propriedades durante períodos de tempo longos, i.e., o óleo deve ser resistente a oxidação.

Algumas condições de operação envolvem temperaturas moderadas e nenhuma variação muito grande de temperatura. Tais condições solicitam pouco o óleo utilizado. Outras condições envolvem temperaturas de operação elevadas em uma faixa grande de temperaturas, como por exemplo, na lubrificação de motores de automóvel. Tais condições demandam muito a resistência a oxidação do óleo e requerem que a variação da viscosidade com a temperatura seja mantida a menor possível.

As condições de mercado demanda basicamente o suprimento de três tipos de óleo: alto (HVI), médio (MVI) e baixo (LVI) índices de viscosidade. Na refinaria é mais econômico produzir somente alguns graus de cada tipo e misturá-los para obter qualquer viscosidade necessitada.

Os óleos LVI que contém a maioria dos radicais aromáticos não são tão resistentes à oxidação e mostram uma maior variação da viscosidade com a temperatura do que os óleos naftênicos MVI ou os parafínicos HVI. Os óleos LVI são portanto usados em aplicações onde não são envolvidas temperaturas elevadas e onde a faixa de variação de temperaturas é pequena. Em aplicações

envolvendo temperaturas altas, onde a variação da temperatura e a estabilidade da oxidação são importantes torna-se necessário usar óleos MVI ou HVI.

Os óleos HVI são produzidos dos crús parafínicos. Os óleos lubrificantes não destilados são fracionados em vários óleos de diferentes viscosidades. Estes são tratados com solventes seletivos para remover os compostos aromáricos complexos. Neste estágio, as frações do óleo são semi-sólidas à temperatura ambiente por causa dos ceráceos componentes parafínicos, os quais são removidos pela diluição do óleo com solventes de baixa solubilidade a cêra, resfriando a mistura e filtrando o precipitado ceráceo.

A grande complexidade da refinação e a baixa demanda do produto no mercado fazem dos óleos HVI mais caros do que os óleos MVI e LVI.

Os óleos MVI e LVI são produzidos dos óleos crús contendo grandes quantidades de compostos naftênicos e aromáticos. No caso de óleos LVI a refinação é feita com ácido sulfúrico que reage com os poliaromáticos. Para produzir os óleos MVI é necessária uma extração por solventes mais severa, a qual remove a maior parte dos compostos diaromáticos e poliaromáticos deixando para trás os monoaromáticos e os saturados.

3.4.1 - Composição dos Óleos Lubrificantes

Depois da refinação os óleos lubrificantes são constituidos principalmente de compostos com radicais cíclicos, do tipo naftênico e aromático, com cadeias parafínicas laterais. Um grande número de hidrocarbonetos ainda permanecem presentes. Métodos analíticos muito complexos mostram que um óleo é composto de:

Saturados	Volume (%)
Alcanos	15
Monocicloalcanos	22
Dicicloalcanos	14
Tricicloalcanos	11
Tetracicloalcanos	7
Pentacicloalcanos	4
Hexacicloalcanos	2

Aromáticos	Volume (%)
Monoaromáticos	18
Diaromáticos	6
Triaromáticos	1

As composições dos óleos tem sido relacionadas com propriedades físicas simples como o índice de refração , densidade e peso molecular médio, com a finalidade de se obter um quadro do óleo em termos da porcentagem de átomos de Carbono presentes na forma aromática, nos ciclos naftênicos e nas estruturas parafínicas simples ou cadeias laterais.

A Tabela 3.2 mostra uma análise estrutural típica de grupos de óleos e a Tabela 3.3 ilustra as propriedades físicas de alguns óleos lubrificantes típicos.

Grupo de Óleos	Peso Específico	Viscosidade Cinemática, cSt a 40°C	Peso Molecular Médio	C_A %	C_N %	C_P %	R_A	R_N	R_T
LVI	0,926	22	280	22	32	46	0,8	1,4	2,2
LVI	0,943	115	370	23	26	51	1,1	1,6	2,7
MVI	0,882	34	385	4	37	59	0,2	2,1	2,3
MVI	0,910	140	440	8	37	54	0,4	2,7	3,1
HVI	0,871	34	405	6	26	68	0,3	1,4	1,7
HVI	0,883	112	520	7	23	70	0,4	1,8	2,2
HVI	0,899	560	685	8	22	70	0,7	2,3	3,0
Óleo Branco Medicinal	0,890	76	445	0	42	58	0	2,8	2,8

C_A - Hidrocarbonetos aromáticos

C_N - Cadeias cíclicas

C_P - Hidrocarbonetos parafínicos

R_T - Nº total de cadeias cíclicas

Tabela 3.2 - Análise de grupo estrutural típica.

	Óleos HVI, refinados com solvente			Óleos MVI, refinados com solvente		Óleos LVI, tratados com ácido		
	Destilado, baixa viscosidade	Destilado, média viscosidade	Residual, alta viscosidade	Destilado, baixa viscosidade	Destilado, média viscosidade	Destilado, baixa viscosidade	Destilado, média viscosidade	Destilado, alta viscosidade
Peso Específico 16°C	0,868	0,883	0,899	0,888	0,980	0,925	0,946	0,963
Viscosidade Cinemática, cSt.								
a 100°C	5,3	11,3	32,2	4,8	10,2	3,54	13,5	37,7
a 40°C	33,5	112	560	32,2	138	21,7	270	1925
Índice de viscosidade	98	95	95	45	41	0	0	-14
Ponto de Fluidez °C	-9,5	-9,5	-9,5	-40	-26	-40	-18	-4,5
Ponto de Fulgor °C								
Fechado	213	243	274	165	218	163	204	261
Aberto	224	257	293	174	229	171	215	277
Ponto de inflamação °C	246	285	32	199	252	193	243	304
Cor, ASTM	L 1,5	L 3,5	6,0	1,0	L 2,0	1,5	3,5	L 7,5 diluído

Tabela 3.3 - Propriedades físicas de alguns óleos lubrificantes típicos.

3.4.2 - Forma e Tamanho das Moléculas de Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos n-parafínicos sólidos se cristalizam em cadeias em zigue-zague com uma distância de 1,54 Å entre os átomos de carbono (1 Å = 10^{-8} cm). A área da seção transversal é da ordem de 20 a 22 Å quadrados. As dimensões de algumas n-parafinas são:

	C_6H_{14}	$C_{25}H_{52}$	$C_{40}H_{82}$
Comprimento, Å	10	34	53
Volume $(Å)^3$	200	700	1100

Na fusão, a distância entre os carbonos não mudam mas as moléculas tornam-se extremamente flexíveis e consequentemente tem baixa viscosidade. As moléculas ramificadas são mais difíceis de formar camadas e portanto reduzem a flexibilidade.

Assim,

n-parafinas - moléculas flexíveis
iso-parafinas - menos flexíveis
ciclo-parafinas - rígidas

4 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS ÓLEOS LUBRIFICANTES

As moléculas em um líquido são razoavelmente compactadas. Portanto, a resistência dos líquidos para escoar - sua viscosidade - dependerá criticamente do tamanho e forma das moléculas, sua flexibilidade e das forças atrativas e repulsivas que existe entre as moléculas. Se o líquido for de baixa viscosidade, ou seja, as moléculas fluem facilmente umas sobre as outras, então as mudanças na temperatura e pressão que variam o espaçamento médio das moléculas terão menores efeitos na viscosidade do que no caso de óleos mais viscosos.

As forças interatomicas entre moléculas aromáticas são mais fortes do que nas moléculas parafínicas e isto reflete na maior densidade, na maior resistência a compressão sob pressão, no maior coeficiente de dilatação térmica, maior calor de evaporação e na

maior tensão superficial dos óleos contendo mais radicais aromáticos - o óleos LVI. Tais óleos também mostram maiores variações na viscosidade com as variações da temperatura e pressão do que os óleos mais parafínicos e naftênicos, os óleos MVI e HVI.

4.1 - Definições

4.1.1 - Viscosidade absoluta

Um dos problemas fundamentais na teoria da lubrificação é o efeito da resistência interna de um fluido usado como lubrificante. A expressão para esta resistência interna, chamada de viscosidade, pode ser obtida através da aplicação da lei de Newton de escoamento viscoso para o sistema mostrado na Figura 4.1. Nesta figura, a superfície inferior é estacionária e a superior move-se para a direita com uma velocidade U. As duas superfícies paralelas são separadas por um lubrificante de espessura h.

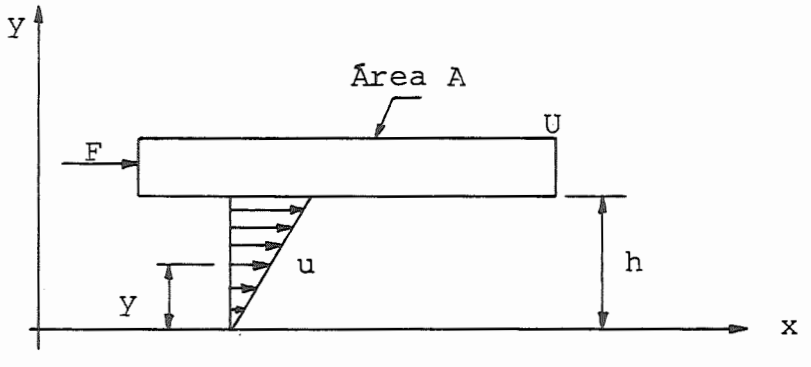


Figura 4.1 - Duas superfícies em movimento relativo, separadas por uma película de óleo em escoamento laminar, com um gradiente linear de velocidade.

Quando duas superfícies, em movimento relativo, são separadas por um lubrificante, neste caso, um filme de óleo, tem-se então o escoamento do óleo. Na maioria dos problemas de lubrificação, as condições são tais que o escoamento que ocorre é laminar. Nestas

condições, assume-se que existe uma perfeita adesão, isto é , a lamina imediatamente adjacente a superfície móvel, se movimenta com a mesma velocidade que esta, enquanto que a imediatamente adjacente a superfície estacionária, tem velocidade zero. As laminas intermediárias movem com velocidades variando linearmente de 0 a U. Como as camadas laminares tem velocidade diferente, cada camada desliza sobre a adjacente.Uma força F é necessária para produzir este deslizamento. A resistência que o fluido oferece a esta força é conhecida como tensão de cisalhamento, a qual produz o atrito fluido.

A lei de Newton do escoamento viscoso, estabelece que em qualquer ponto do filme de fluido, a tensão de cisalhamento é proporcional ao gradiente de velocidade:

$$\tau \alpha \frac{du}{dy}$$

ou

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

onde η é a constante de proporcionalidade chamada de coeficiente viscosidade absoluta, ou viscosidade absoluta ou simplesmente de viscosidade, du é a variação da velocidade e dy é a variação da espessura da película.

Como a velocidade varia linearmente através do filme,

$$\frac{du}{dy} = \frac{U}{h}$$

A tensão de cisalhamento pode ser escrita como:

$$\tau = \frac{F}{A}$$ onde A é a área cisalhada

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

ou $F = \eta \frac{AU}{h}$ (1.1)

Assim, a força de atrito fluído necessária aumenta com a área e a velocidade. Convém aqui lembrar que o atrito sêco (ou sólido) independe da velocidade e da área, mas depende da carga.

A viscosidade, a resistência do fluido para escoar, pode ser expressa dimensionalmente resolvendo a equação (1.1) para η.

$$\eta = \frac{Fh}{AU} = \frac{[dyna]\,[cm]}{[cm^2]\,[cm/s]} = \text{poise} \quad \text{(Sistema c.g.s.)}$$

$$\text{ou} \quad \eta = \frac{[N]\,[m]}{[m^2][m/s]} = \frac{N.s}{m^2} = \text{Poiseulle (Sistema S.I.)}$$

$$1\ P = 1\ N.s/m^2 = 10 \text{ poise}$$

4.1.2 - Viscosidade cinemática

É definida como a relação entre a viscosidade dinâmica e a densidade a uma determinada temperatura e pressão.

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

A unidade c.g.s. é o Stoke $[cm^2/s]$, e a unidade de S.I. é $m^2.s^{-1}$

$$1\ m^2.s^{-1} = 10^6 \text{ cSt}$$

4.1.3 - Índice de Viscosidade

O I.V. (índice de viscosidade) é uma medida usada para a variação da viscosidade de um fluido com a temperatura (Dean and Davis - 1929). Quanto maior o índice de viscosidade (I.V.) de um óleo, menor a variação relativa da viscosidade desse óleo com a temperatura. Historicamente, aos altamente parafínicos óleos da Pensilvania que mostravam a menor das variações de viscosidade com a

temperatura em uma faixa de 40°C a 100°C foi designado um I.V. = 100, enquanto que aos óleos derivados dos crús da "Gulf Coast" foi designado I.V. = 0. Na determinação do índice de Viscosidade de um óleo, são primeiramente determinadas as viscosidades a 40°C e 100°C respectivamente. Se o óleo de índice de Viscosidade desconhecido tem uma viscosidade U a 40°C e os dois óleos de referência de I.V. = 0 e I.V. = 100 tem viscosidades L e H respectivamente, então o I.V. do óleo desconhecido é dado por:

$$I.V. = \frac{L - U}{L - H} \times 100,$$ conforme mostra a figura 4.2

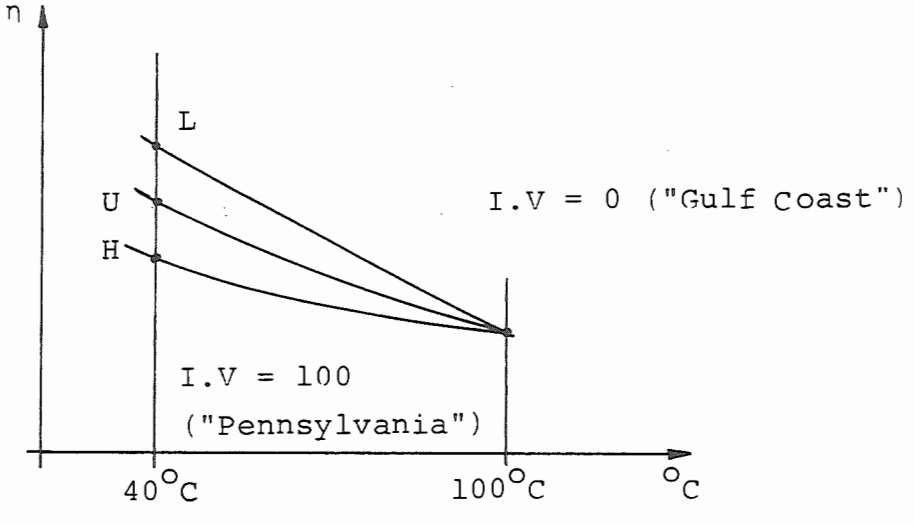


Figura 4.2 - Índice de Viscosidade

Os óleos comerciais HVI tem índices de Viscosidade entre 90-100, os LVI com cerca de 0 e os MVI entre 40-70. Infelizmente, o índice de Viscosidade não é uma medida direta da variação da viscosidade com a temperatura, pois a magnitude da variação é fortemente afetada pelo nível de viscosidade como mostra a Tabela 4.1.

O efeito da temperatura é ilustrado na Tabela 4.1. O sistema I.V. é um sistema arbitrário. Nas temperaturas baixas, é limitado pelo volume livre das moléculas; nas temperaturas altas, é limitado pela energia.

Temperatura °C	Viscosidade, cSt, de óleos com Índice de Viscosidade								
	0	40	100	0	40	100	0	40	100
100	2,0	2,0	2,0	10,0	10,0	10,0	20,0	20,0	20,0
40	8.38	7.68	6.63	162,9	133,5	89,3	552,4	431,3	249,7
Relação $\frac{V40°C}{V100°C}$	4,19	3,84	3,31	16,3	13,3	8,9	27,6	21,5	12,5

Tabela 4.1 - Variação do Índice de Viscosidade

Relações úteis, que auxiliam a determinação do I.V.:

$$\log_{10} \log_{10} (V + 0,6) = n \log_{10} T + C \qquad (1.2)$$

onde V = viscosidade cinemática, cSt
T = temperatura °Rankine
n,C = constantes

Equação de Roelands

$$\log (1200 + \log \eta) = CS\log (1 + \frac{t}{135}) \qquad (1.3)$$

onde η = viscosidade dinâmica, cP
t = temperatura, °C
C,S = constantes

Com as relações (1.2) e (1.3) podem ser produzidos gráficos, como os da ASTM (American Society for Testing Materials) nos quais as curvas da viscosidade-temperatura são linhas retas. Estas cartas podem ser usadas para estimar a viscosidade de misturas de dois óleos de viscosidades conhecidas. (Figura 4.3).

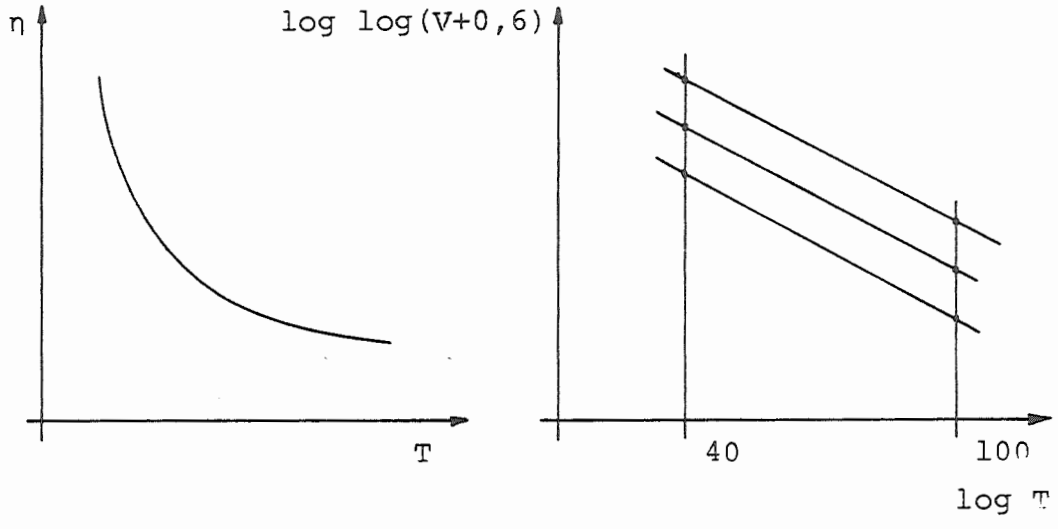


Figura 4.3 - Curvas viscosidade-temperatura.

Analogamente ao efeito da temperatura, quanto mais a viscosidade de um óleo é afetada pela temperatura, da mesma forma será ela afetada pela pressão. Portanto, óleos de baixa viscosidade são menos afetados pela pressão que os de alta viscosidade. Quanto maior a temperatura, menor será o efeito da pressão. Assim, o efeito de aumentar a pressão em um óleo, é semelhante a reduzir a temperatura relativamente ao volume de óleo. Esses pontos são ilustrados na Figura 4.4 e Tabela 4.2. Na figura 4.4, a viscosidade do óleo sob pressão elevada é dada por

$$\eta_p = (\eta\alpha)^{0,7}$$

onde η = viscosidade dinâmica

$\alpha = 2 \times 10^{-8} \frac{m^2}{N}$

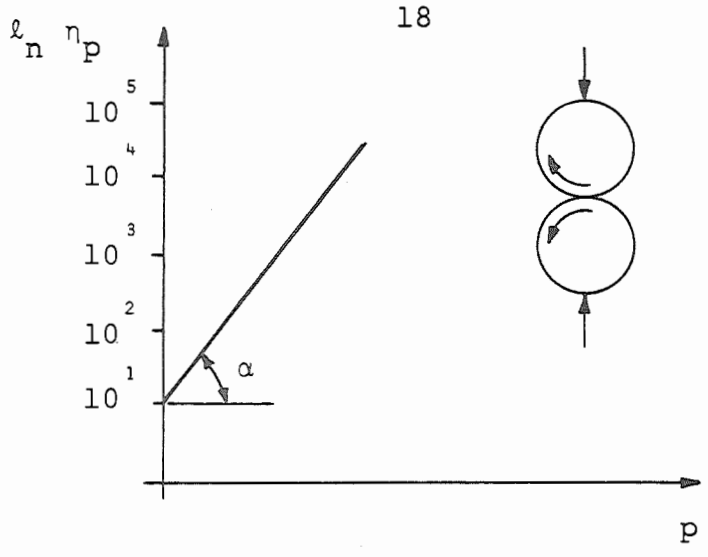


Figura 4.4 - Viscoelasticidade de óleos sob pressão elevada.

Pressão psi	Viscosidade, cP, de óleos					
	HVI			LVI		
	30°C	60°C	90°C	30°C	60°C	90°C
0	890	137	38,5	1700	149	32,6
5000	2200	302	76,6	5300	393	73,4
10000	5400	640	146	17300	1020	158
15000	12000	1240	251	50000	2400	314

Tabela 4.2 - Efeito da pressão na viscosidade.

4.3 - Efeito da Temperatura e Pressão na Densidade

A densidade aumenta com o aumento da viscosidade. Os óleos LVI são mais densos que os MVI e estes mais que os HVI. Por exemplo, conforme mostra a Tabela 4.3.

Óleo	Viscosidade, cSt a 40°C	Densidade g/ml
LVI	20	0,93
LVI	150	0,94
MVI	15	0,87
MVI	150	0,91
HVI	20	0,87
HVI	150	0,89

Tabela 4.3 - Variação da densidade dos óleos lubrificantes.

A variação da densidade com a temperatura é dada por:

$$d_t = d_{20°C} - A_1 (t-20) - A_2 (t-20)^2$$

onde d_t = densidade a t°C
para óleos de viscosidade média, $A_1 = 6,4 \times 10^{-5}$, $A_2 = 1,5 \times 10^{-7}$

Os lubrificantes diferem pouco em compressibilidade; os óleos LVI são pouca coisa menos compressíveis que os óleos HVI e MVI. A compressibilidade aumenta com o aumento da temperatura, conforme ilustra, tipicamente a Tabela 4.4.

Pressão psi	% de compressibilidade - redução em volume -a	
	20°C	100°C
10000	3,3	4,2
20000	5,6	7,2
30000	7,5	9,5
40000	9,1	11,4
50000	10,5	12,9

Tabela 4.4 - Compressibilidade dos óleos lubrificantes.

4.4 - Calor Específico, Condutividade Térmica, Resistividade Elétrica, Solubilidade

$$\text{Calor específico} = \frac{0,388+0,00045t}{\sqrt{d}}$$

onde: t = temperatura (°F)
d = densidade do óleo a 60°F comparado com a água a 60°F

$$\text{Condutividade térmica: } K = \frac{0,821-0,00024t}{d}$$

K = Btu/ft.h.°F, t-°F, d = densidade 60°/60°F

Resistividade elétrica: 10^{14} ohm/cm para óleos limpos e sêcos.

Solubilidade do ar: os óleos dissolvem aproximadamente 10% de ar em volume. As pressões mais altas o peso do ar dissolvido aumenta mas desde que o volume de ar é diminuido, a solubilidade permanece nos 10% por volume.

5 - ADITIVOS DOS ÓLEOS LUBRIFICANTES

Aditivos são compostos adicionais aos óleos lubrificantes, em pequenas porcentagens, para preservar as propriedades desejáveis do óleo, como aditivos antioxidantes; para aumentar as propriedades naturais do óleo como os aditivos antiferrugem, ou para permitir que o óleo possa ser usado onde um óleo mineral não teria um desempenho satisfatório, como os lubrificantes de extrema pressão.

Os principais tipos de aditivos são:

a) Anti-Oxidantes:

A oxidação reduz a vida útil de um óleo causando a formação de ácidos corrosivos. Como uma regra de operação, a taxa de oxidação dobra para cada aumento de 10°C na temperatura. A oxidação é uma reação em cadeia.

Início da reação: RH(Hidrocarboneto) = R.(radical livre)+H.

Propagação da reação: $R. + 0_2 = R00.$ (Radical peróxido)

$R00. + RH = R00H$ (Peróxido) + R.

Tipicamente, esta sequência pode ocorrer 5 vezes antes que a cadeia seja rompida.

A redução ao peróxido R00H é responsável pelos íons produzidos pela oxidação indesejável e também pelas reações de ramificações da cadeia na qual a decomposição de uma molécula R00H conduz à produção de dois radicais livres R., os quais aceleram a reação em cadeia.

Os óleos lubrificantes são geralmente mais resistentes a oxidação do que os hidrocarbonetos puros devido a presença dos inibidores naturais. Se estes forem removidos pela sobre-refinação, a re

sistência do óleo contra a oxidação é afetada.

Traços de certos metais, particularmente o cobre, ferro e chumbo, dissolvidos no óleo aumentam bastante a taxa de oxidação. Somente algumas partes por milhão são necessárias, e tais traços metálicos podem ser introduzidos facilmente pela ação dos produtos de oxidação nas tubulações de cobre, etc.

Os aditivos anti-oxidantes, como o próprio nome implica, são compostos que em pequenas proporções, reduzem a taxa de oxidação do óleo notavelmente. Várias classes de compostos são usados comercialmente: fenóis, aminas, tio-fosfatos. Elas operam através da reação com os radicais peróxidos e pela interrupção da reação em cadeia, reagindo com moléculas de peróxido para produzir produtos inofensivos e removendo da solução os metais catalizadores como o cobre.

Um óleo HVI totalmente inibido contra a oxidação deve ter uma vida útil cerca de 100.000 horas a 40°C, mesmo quando em condições severas de aeração e catalização. A 60°C, a vida pode ter cerca de 10.000 horas.

Um óleo LVI sem anti-oxidantes deve ter vidas entre 4.000 e 1.000 horas a 40°C e 60°C respectivamente.

b) Reforçadores do I.V.:

Os compostos poliméricos que existem em configurações apertadamente enroladas nos óleos em estado frio, encontram-se distendidas e integrantes nos óleos quentes. Isto faz então com que o aumento da viscosidade seja proporcionalmente maior nas temperaturas altas do que nas baixas, diminuindo assim o efeito da temperatura na viscosidade do óleo. Tais óleos são não-Newtonianos e os polímeros devem ser relacionados cuidadosamente para reduzir a perda temporária da viscosidade nas taxas de cisalhamento altas devido ao alinhamento das moléculas e perda permanente da viscosidade devido a ruptura das moléculas. Os reforçadores do I.V. são usados nos óleos automotivos "multi-grade" e em alguns fluidos hidráulicos.

c) Aditivos para Lubrificação Limite e de Pressão Extrema:

Onde pressões muito elevadas e/ou velocidades muito baixas impedem a geração de uma película de óleo suficientemente espessa para evitar o contato

metal com metal,acompanhado de desgaste e riscamento, são usados aditivos desse tipo.

Os aditivos para lubrificação limite são compostos orgânicos polares, como os ácidos esteárico e oleico, os quais quando dissolvidos em um óleo se concentram nas superfícies metálicas, e se estas forem de materiais usuais como o aço, reagem formando sabões metálicos, como por exemplo, os estearatos de ferro. Tais sabões fornecem películas de baixo atrito limitadas pelo ponto de fusão do sabão.

Para condições mais severas, como por exemplo nos pares hipóides, são usados compostos orgânicos de enxofre, cloro ou fósforo. Sob condições de temperatura alta, gerada em contatos pesadamente carregados estes compostos reagem com as superfícies metálicas para formar películas de sulfetos, sulfatos, cloretos e fosfatos metálicos com ponto de fusão elevado. O cloreto ferroso tem um ponto de fusão de 690°C e o sulfeto ferroso, 1200°C.

A reatividade de um aditivo de Pressão Extrema (P.E.) constitui a sua propriedade principal,se os átomos de cloro estiverem muito firmemente ligados ao resto da molécula este não será um bom aditivo de P.E., por outro lado se estes forem muito livremente ligados à molécula, este será corrosivo.

d) Aditivo Dispersante:

O óleo nos motores de combustão interna normalmente tornam-se contaminados pelo material insolúvel derivado do próprio óleo lubrificante e da decomposição do combustível. Tais materiais incluem os compostos de chumbo, fuligem e sujeira. Inicialmente estes são presentes na forma de partículas pequenas e inofensivas. A coagulação das mesmas, formando depósitos nocivos, deve ser evitada. Os aditivos dispersantes polares fazem este trabalho pela absorção das pequenas partículas impedindo a sua coalescencia e sedimentação.

e) Aditivos Anti-Espumante:

Se de um lado os óleos minerais são resistentes à formação de espuma devido as condições mecânicas a que eles estão sujeitos ou a presença de

contaminante, os aditivos, por outro lado, podem conduzí-los ao problema da espuma. Aditivos são então usados, os quais são absorvidos nas finíssimas películas de óleo entre as bôlhas de ar da espuma. Isto faz com que as películas de óleo tornem-se não homogêneas e instáveis, causando a ruptura da película e consequentemente da espuma.

f) Aditivos Anti-ferrugem:

Em certas condições onde é impossível excluir a água, as propriedades anti-ferrugem naturais do óleo podem ser aumentadas por compostos que absorvem esta das superfí - cies metálicas e conjuntamente com o óleo formam uma película que é impérvia a água.

g) Abaixadores do Ponto de Fluidez:

O ponto de estabilização, a baixas temperaturas, de óleos contendo substâncias de maior pêso molecular,é devido a separação dos cristais dessas substâncias, que a medida que crescem e solidificam, formam rêdes interligadas que impedem os componentes ainda líquidos de se escoarem.

Os coloides, abaixadores do Ponto de Fluidez, podem abaixar o ponto de fluidez ou ponto de estabilização desses óleos de até 10°C. Eles se adsorvem aos cristais das substâncias em crescimento limitando seus tamanhos e conse - quentemente sua habilidade de formar emaranhados.

6 - CUIDADOS COM OS ÓLEOS LUBRIFICANTES NA PRÁTICA

Algumas medidas simples podem aumentar notavelmente a vida útil de um óleo. Estas são:

a) Manter a temperatura dos óleos um pouco baixa e evitar sobreaquecimento local como os causados por aquecedores elétricos inadequados.

b) Evitar agitação excessiva que possa causar a formação de espuma e também introduza ar ao seio do óleo.

c) Evitar metais com atividade catalítica alta como o cobre.

d) Remover as partículas abrasivas e resíduos próferrugem por filtragem.

e) Manter o óleo isento de água ou providenciar sua

remoção.

f) Quase toda a contaminação gera oxidação, formação de espuma ou emulsificação.

g) Óleos parcialmente oxidados são catalizadores eficientes para a oxidação de óleos novos. Assim, na troca de óleos, remover todo o óleo usado.

h) Os sistemas novos de linhas de alimentação devem ser inspecionados com relação a cavacos, ferrugem e compostos seladores.

i) No projeto de um mecanismo novo ou máquina, a lubrificação deve ser considerada nos estágios iniciais. Utilizar as facilidades e informações fornecidas pelas companhias de óleos.

7 - ENSAIOS DE ÓLEOS LUBRIFICANTES

Na compra e venda de óleos lubrificantes, as suas propriedades são descritas em termos dos resultados de testes, alguns dos quais fornecem valores absolutos como a viscosidade cinemática e a densidade, e outros são testes arbitrários peculiares às indústrias de óleos.

É importante realizar que testes arbitrários não podem ser relacionados com as situações práticas mas usados somente com fins de especialização e controle e que devem ser executados sob condições rigorosamente controladas.

Detalhes sobre testes de óleos lubrificantes, e o seu significado podem ser obtidos através das publicações das seguintes entidades:

1- Instituto Brasileiro do Petróleo.

2- Associação Brasileira de Normas Técnicas.

7.1 - Ensaios Mecânicos de Lubrificantes

Teoricamente, o melhor lugar para desenvolver um teste de um lubrificante é no mecanismo no qual vai ser usado. Isso raramente é possível existindo a necessidade de bancos de ensaios em escalas menores que possam operar em condições controladas rigorosamente e forneçam repetibilidade de resultados a custos razoáveis. Um

óleo sob ensaio, digamos para uso em um par hipoide, deve passar nos seguintes estágios de ensaios mecânicos.

a) Bancos de simulação - por exemplo o de quatro esferas. O atrito,desgaste e capacidade de carga do óleo são medidos usando componentes de ensaios que não apresentam nenhuma semelhança com a engrenagem hipoide, como no caso, as esferas de aço de meia polegada. São necessários óleos de referência com desempenho conhecido.

b) Bancos de engrenagens utilizando engrenagens precisas,como por exemplo o banco de ensaios de engrenagens I.A.E.

Neste banco de ensaios, são efetuados ensaios com duração de 5 minutos, aumentando-se as cargas até que o filme de óleo se rompe, ocorrendo o riscamento.

c) Bancos de ensaios utilizando as engrenagens produzidas, como por exemplo, os bancos de engrenagens hipoides.

São usados,neste caso, as engrenagens da produção normal e os resultados apresentam uma grande variação . As condições de ensaio podem ser tão próximas quanto possível das condições de operação normal ou alguma condição crítica pode ser acentuada, como o alto torque a baixa velocidade.

Se o óleo tem um bom desempenho em todos esses bancos de ensaios, deverá então ser testado em automóveis ou caminhões e finalmente um teste de campo em grande escala deverá ser efetuado.

8 - GRAXAS LUBRIFICANTES

As graxas são dispersões sólidas ou semi-sólidas de um agente aglomerante em um lubrificante líquido. Elas podem conter aditivos tais como os anti-oxidação, anti-desgaste, anti-corrosão bem como lubrificantes sólidos. A maioria das graxas tem como aglomerantes, os sabões metálicos e como fluido lubrificante,os óleos minerais. Os sabões se apresentam como fibras cristalinas de 1-100 microns de comprimento podendo formar pequenos ou grandes agregados, resultando em uma aparência lisa ou fibrosa. A quebra das fibras pelo trabalho mecânico severo reduz notavelmente o efeito aglomerante da graxa.

8.1 - Reologia

As graxas são sólidos plásticos, não-Newtonianos. Possuem um ponto de escoamento e viscosidade extremamente alta nas taxas de cisalhamento baixas, por exemplo, 10^{11} poises. A medida que a taxa de cisalhamento aumenta, a viscosidade cai rapidamente, aproximando-se da viscosidade do óleo do qual foi feita.

O valor da tensão de escoamento de uma graxa é muito importante,pois através dela verifica-se a habilidade da graxa suportar a si mesma. Em um mancal de rolamento, a graxa não deve se escoar em grande quantidade para dentro das partes móveis, onde seria agitada violentamente, causando superaquecimento.

As graxas são feitas em uma gama de consistência ou maciêz, variando o tipo e concentração do sabão e, em uma menor proporção, o óleo base. As graxas muito macias são usadas em sistemas de lubrificação centralizados onde esta deve ser bombeada lentamente para as linhas de alimentação. As graxas muito duras, são usadas para a lubrificação de mancais radiais de baixa velocidade. A Tabela 8.1 mostra a consistência de algumas graxas. Os graus NLGI de 1 a 4, nesta tabela , são os mais adequados para a lubrificação de mancais de rolamento.

Número NLGI	Penetração (décimos de milímetro)	Aplicação
000	445-475	Graxas semi-fluídas
00	400-430	
0	355-385	Aplicações a baixa temperatura e
1	310-340	Sistema de lubrificação centralizada com linhas de alimentação compridas.
2	265-295	Uso geral, industrial, automobilístico
3	220-250	Mancais grandes a velocidade alta, Vibração, temperatura alta.
4	175-205	Graxas do tipo duro,lubrificação de mancais a baixa velocidades.
5	130-160	
6	85-115	

Tabela 8.1 - Aplicação de graxas lubrificantes.

8.2 - Lubrificação com graxa

Os óleos produzem um menor atrito do que as graxas, na lubrificação de mancais, além de serem mais eficientes na eliminação do calor, mas, requerem normalmente métodos elaborados de aplicação, atenção mais frequente e sistemas de vedação mais eficientes. As graxas necessitam equipamentos simples, pouca ou nenhuma atenção e por si mesma provê a vedação contra contaminação e corrosão. A maioria dos mancais de rolamento são agora lubrificados com graxa.

O mecanismo pelo qual uma graxa lubrifica é ainda um assunto de controversias. A maioria das graxas em alojamentos de mancais é estacionária. A lubrificação é feita ou pelo óleo da graxa ou por uma muito pequena quantidade de graxa. O correto preenchimento do mancal com graxa é de importância vital, pois muito pouca quantidade faz com que o mancal trabalhe a sêco, provocando danos, e grande quantidade causa agitação e superaquecimento. O mancal deve ser preenchido completamente com graxa, mas os alojamentos devem ser preenchidos somente de 2/3 a 3/4, deixando espaço para o mancal eliminar o excesso de graxa durante a operação inicial. Depois do período inicial, no qual um aquecimento considerável pode ocorrer, o mancal deve estabilizar-se a uma temperatura não muito mais alta que a ambiente.

9 - LEITURA COMPLEMENTAR

GUNTHER, C. - Lubrication. Chilton Book Company. 1971.

HERSEY, M.D. - Theory and Research in Lubrication. John Wiley & Sons, Inc. 1966.

BONDI, - The Physical Chemistry of Lubricating Oils. Reinhold.

FREEMAN, - Lubrication and Friction. Pitman.

A.S.M.E. - Viscosity and Density of over 40 lubricating fluids of known composition at pressures to 150000 psi and temperatures to 425°F. 1953.

DAVENPORT, T.C. - The Reology of Lubricants. Applied Science Publishers Ltd. 1973.

PUGH, B. - Practical Lubrication. Newnes-Butterworth. 1970.

MITCHEL, A.G.M. - Lubrication. Blackie & Sons Ltd. 1950.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS

TRIBOLOGIA

III - REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

B. de M. Purquerio
M.Sc. (Tribologia), Ph.D.

SÃO CARLOS
1983

III - REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

1- LUBRIFICANTE - DEFINIÇÃO

Um lubrificante pode ser definido,grosseiramente, como qualquer substância empregada para reduzir e atrito e o desgaste e que seja capaz de assegurar aos componentes de máquinas um funcionamento suave, bem como uma vida satisfatória. A maioria dos lubrificantes são líquidos, como por exemplo os óleos minerais, óleos sintéticos(esteres e silicone) e água, mas podem ser sólidos como o P.T.F.E. (teflon) ou ainda gasosos como o ar ou dióxido de carbono.

É sobejamente conhecido o fato de que a aplicação de um lubrificante entre duas superfícies em contato e em movimento relativo, pode ter um efeito notável sobre a resistência ao movimento, chiados, irregularidades do movimento, atrito excessivo e desgaste, pois todos eles podem ser reduzidos ou eliminados. Porém, quais são as reações físicas e químicas entre os sólidos e os lubrificantes que proporcionam todos esses efeitos? Essa pergunta poderá ser respondida a medida que forem analisados os 4 regimes de lubrificação, ou sejam:

a) Lubrificação com filme de fluído
b) Lubrificação limite
c) Lubrificação mista
d) Lubrificação elastohidrodinâmica

2 - REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

2.1- Lubrificação com Filme de Fluido

A condição em que um filme de lubrificante seja suficientemente espesso para evitar que duas superfícies sólidas opostas entrem em contato é descrita como sendo lubrificação com filme de fluido e as características do atrito dessa combinação podem ser explicadas dentro da estrutura da mecânica dos fluidos.

Essa condição é frequentemente considerada como a forma ideal de lubrificação desde que ela propor -

cione um atrito pequeno e uma resistência ao desgaste bastante elevada. O comportamento do contato é governado pelas propriedades físicas do lubrificante considerado como um todo , notavelmente a viscosidade, e as características do atrito surgem unicamente devido ao cizalhamento do lubrificante viscoso.

2.2- Lubrificação Limite

Se as superfícies dos sólidos não são separadas pelo lubrificante e o contato ocorre em uma área comparável à quela do contato sêco, a condição é denominada lubrificação limite, e as características do atrito são determinadas pelas propriedades dos sólidos e do lubrificante na interface comum. Neste caso, são as propriedades físicas e químicas das finíssimas películas superficiais de proporções moleculares que governam as características do contato. As propriedades do lubrificante como um todo, são de somenos importância e o coeficiente de atrito essencialmente independente da viscosidade . A ação da superfície que determina a conduta dos lubrificantes limite pode ser descrita conforme a "resistência do filme" da seguinte maneira:

a) camadas de lubrificantes gasosos, líquidos ou sólidos adsorvidas físicamente;

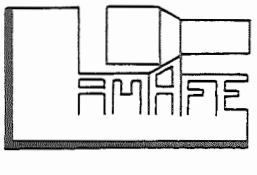
b) camadas adsorvidas químicamente;

c) filmes formados por reação química.

2.2.1- Camadas adsorvidas físicamente

Tais camadas são formadas por forças inter-moleculares a curta distância e o processo é reversível. Uma camada de lubrificante com uma ou mais moléculas de espessura fica aderida às superfícies dos sólidos, proporcionando uma proteção modesta contra o desgaste. O limite da resistância do filme é definido por uma temperatura de transição a qual é bem próxima do "ponto de fusão" do lubrificante.

Os filmes adsorvidos químicamente oferecem uma proteção ou resistância do filme moderada enquanto que os filmes formados por reação química fornecem um grau mais elevado de proteção superficial.



O lubrificante mais comum, o óleo mineral, é constituído de um número enorme de diferentes moléculas de hidorcarbonetos. A maioria dessas moléculas são hidrocarbonetos saturados tendo uma estrutura em cadeia ou anel a qual fica em equilíbrio. As moléculas oferecem muito pouca proteção às superfícies sólidas do mancal na ausência da lubrificação com filme de fluido. Elas são constituídas de grupos parafínicos, naftênicos e aromáticos ligados para formar moléculas mais complexas.

Os óleos minerais contém pequenas mas importantes quantidades de substâncias reativas como o enxofre, nitrogênio e oxigênio. Esses heteroátomos reagem rapidamente com as superfícies expostas mais recentes do metal resultando em propriedades valiosas da lubrificação limite.

É uma prática comum adicionar pequenas quantidades (até cerca de 1~2%) de substâncias aos lubrificantes básicos como os óleos minerais se é necessário obter filmes por adsorsão ou reação química, com o objetivo de promover uma proteção extra às superfícies do mancal. Essas substâncias são denominadas aditivos.

2.2.2- Camadas adsorvidas químicamente

As camadas adsorvidas químicamente são geralmente produzidas pela adição de gorduras animal ou vegetal bem como óleos aos óleos básicos. Estes aditivos contém longas cadeias de moléculas de ácido adiposo as quais exibem uma grande afinidade por metais em suas extremidades ativas. A representação usual dessas moléculas polares é semelhante aos pelos de um carpete com as moléculas dispostas perpendicularmente à superfície. Essas moléculas de ácido adiposo formam sabões metálicos os quais possuem baixa resistência ao cisalhamento e portanto gerando coeficientes de atrito na faixa de 0,1 a 0,15. O filme de sabão torna-se denso por causa da orientação preferencial das moléculas. Por exemplo, o ácido esteárico forma uma camada mono-molecular de sabão de estearato de ferro contendo cerca de 10^{14} moléculas por centímetros quadrados de superfície. A eficiência desses filmes é limitada pelo ponto de fusão do sabão (100° para o estearato de

ferro). É essencial escolher um aditivo que reaja com o metal do mancal. Por exemplo, os metais inertes como o ouro e a prata não são lubrificados com eficácia pelos ácidos adiposos.

Exemplos de aditivos de ácidos adiposos são os ácidos esteárico, oleico e laurico. Os filmes de sabão formados por esses ácidos podem reduzir o coeficiente de atrito em até 50% relativamente ao obtido diretamente com o óleo básico. Eles proporcionam uma lubrificação limite adequada para cargas, temperatura e velocidades moderadas e são frequentemente satisfatórios em situações onde existam evidências de danos superficiais modestos.

2.2.3-Filmes formados por reação química

Os filmes formados por reação química são os mais resistentes e são usados nas condições operacionais mais severas. Se as cargas e a velocidade de deslizamento são altas, ocorrem temperaturas de contato também elevadas. Já foi comentado que os filmes formados por adsorção física e química deixam de ser ativos acima de determinadas temperaturas de transição, porém alguns tipos de aditivos começam a reagir e a formar novos sólidos inorgânicos com alto ponto de fusão somente a temperaturas elevadas. Por exemplo, o enxofre começa a reagir a temperatura de 1000°C para formar sulfetos com ponto de fusão acima de 1000°C. Lubrificantes que contêm aditivos como enxofre, cloro, fórforo e zinco são considerados como lubrificantes de pressão extrema (PE) desde que são efetivos nas condições mais árduas.

É digno de nota que o oxigênio da atmosfera ou o oxigênio livre no lubrificantes como um todo é um lubrificante PE de grande valor. O oxigênio forma camadas de óxido as quais geralmente promovem um filme superficial de baixa resistência ao cisalhamento capaz de reduzir o atrito e o desgaste entre as superfícies do mancal.

Considerável uso de superfícies pré-tratadas são hoje utilizadas em mancais. Finas películas de material com baixa resistência ao cisalhamento são depositadas nas superfícies mais duras dos mancais ordinários (mancais hidrodinâmicos). Polímeros como P.T.F.E. são usados

como mancais secos na forma sólida ou empregnada. Sabões e gorduras são aplicados frequentemente às superfícies metálicas antes dos processos de conformação para melhorar a vida das matrizes, como por exemplo na trefilação. O pré-tratamento dos metais em banhos químicos para produzir uma camada superficial de sal inorgânico é comumente usado tanto para aumentar a resistência como evitar a corrosão. Como exemplo temos a fosfatização e a sulforização.

O coeficiente de atrito entre duas superfícies metálicas sêcas e quimicamente limpas é extremamente alto (pelo menos igual a unidade). A oxidação das superfícies normalmente reduz o coeficiente de atrito para cerca de 0,5. A aplicação de um óleo mineral comum às superfícies provoca uma redução do coeficiente para cerca de 0,15, enquanto que um bom lubrificante limite pode reduzir esse valor para cerca de 0,08.

2.3- Lubrificação Mista

No passado era suficiente para o engenheiro distinguir bem os dois regimes de lubrificação: a lubrificação com filme de fluido e a lubrificação limite; porém existe um importante regime de lubrificação mista entre esses dois. Na lubrificação com filme de fluido, a separação das superfícies sólidas opostas é completa. Na lubrificação limite as leis do atrito sêco são aplicadas desde que o coeficiente de atrito independe da velocidade e da área aparente de contato. O valor atual do coeficiente de atrito depende certamente, da natureza do lubrificante limite.

A transição entre a lubrificação limite e a com filme de fluido não ocorre instantaneamente com a diminuição da intensidade do carregamento, pois uma crescente proporção da carga é suportada pelas pressões no fluido que preenche a maioria do espaço entre as superfícies sólidas opostas. Na realidade, é frequentemente muito difícil eliminar os efeitos da lubrificação com filme de fluido para permitir que somente a lubrificação limite ocorra, existindo ainda evidências que sugerem que a lubrificação com microfilme de fluido associada com o grande núme-

ro de mancais em miniatura, formados pelas irregularidades das superfícies, desempenha um efeito importante em alguns casos.

No regime de lubrificação mista as características do contato são determinadas variando as combinações dos efeitos da lubrificação limite e da com filme de fluido. As propriedades do lubrificante, considerado como um todo, e as propriedades químicas do lubrificante limite são todas importantes. Esta é, sem dúvida, uma importante condição de lubrificação desde que muitos elementos de máquinas movem intermitentemente e dessa forma operam nos regimes de lubrificação limite-misto-filme de fluido em diferentes ocasiões. Como exemplo temos os mancais ordinários (hidrodinâmicos) durante as condições de partidas e paradas.

2.4- Lubrificação Elastohidrodinâmica

Foi demonstrado até agora, que os filmes hidrodinâmicos efetivos permanecem frequentemente na região originalmente descrita como lubrificação limite. Esse efeito ocorre como resultado da deformação elástica local dos materiais do mancal e é produzido mais rapidamente em pontos ou linhas de contato com tensão elevada, como ocorre nas engrenagens , mancais de rolamentos e cames . Nessas condições, a viscosidade do lubrificante aumenta consideravelmente devido as elevadas pressões de contato e esse fato auxilia a formação de filmes de fluidos efetivos. A viscosidade em um contato típico em engrenagens ou mancais de rolamentos podem aumentar vários milhares de vezes a viscosidade atmosférica do lubrifi - cante.

De certa forma, o recente desenvolvimento e compreensão da lubrificação elastohidrodinâmica melhorou muito a visão dos regimes de lubrificação. Foi possível estabelecer uma definição mais precisa da lubrificação limite, porém sem ainda eliminar a necessidade de definir um regime de lubrificação mista. Torna-se claro agora que a lubrificação elastohidrodinâmica desempenha um papel importante no comportamento dos mancais ordinários convencionais que operam com cargas elevadas, e juntamente com a lubrificação micro-elastohidrodinâmica, que está relacionada com

a lubrificação com filme de fluido na vizinhança das asperidades deformadas elasticamente, muito ajudam a explicar a aparente demora para o aparecimento do regime de lubrificação limite sob certas condições de operação severas. É muito importante lembrar que a lubrificação elastohidrodinâmica é uma forma de lubrificação com filme de fluido.

3 - QUALIDADE DA TEXTURA SUPERFICIAL

O tipo de lubrificação encontrada em um elemento de máquina é determinado pelas propriedades do lubrificante, carga, velocidade, temperatura, completa geometria das superfícies do mancal e pela qualidade da superfície. A carga, velocidade e temperatura ambiente são normalmente parâmetros fixados, levando o projetista a exercer sua discreção sobre as outras grandezas. Uma vez que o lubrificante é selecionado e a geometria global fixada, o fator final que define o modo de lubrificação vem a ser a qualidade superficial.

A maioria das superfícies de mancais são torneadas ou retificadas e algumas vezes polidas. Dessa forma torna-se conveniente construir uma escala de dimensões típicas como mostra a Figura 3.1. Muito cuidade deve ser tomado quando as superfícies são produzidas com valores c.l.a. de alguns microns e é claramente indesejável gastar tempo e esforços preciosos em fazer uma superfície muito melhor do que ela precisa ser para uma operação satisfatória.

Na realidade, o processo de amaciamento no qual as asperidades são reduzidas em altura sem causar dano ao material da base, constitui um excelente tratamento para a maioria das superfícies de mancais. O processo é frequentemente auxiliado pelo pré-tratamento das superfícies ou pela adição de lubrificantes de extrema pressão (PE) ou ainda lubrificantes limite, durante os estágios iniciais do amaciamento.

Os mancais de rolamento possuem comumente elementos rolantes com uma rugosidade superficial (c.l.a.) entre 2×10^{-8} ~ 10^{-7}, ao passo que a rugosidade das pistas varia entre $(1\sim3)\times10^{-7}$m. Os mancais ordinários geralmente tem uma rugosidade superficial maior, da ordem de 2×10^{-7} a 10^{-6}m. As engrenagens tem uma qualidade superficial semelhante à dos mancais ordinários.

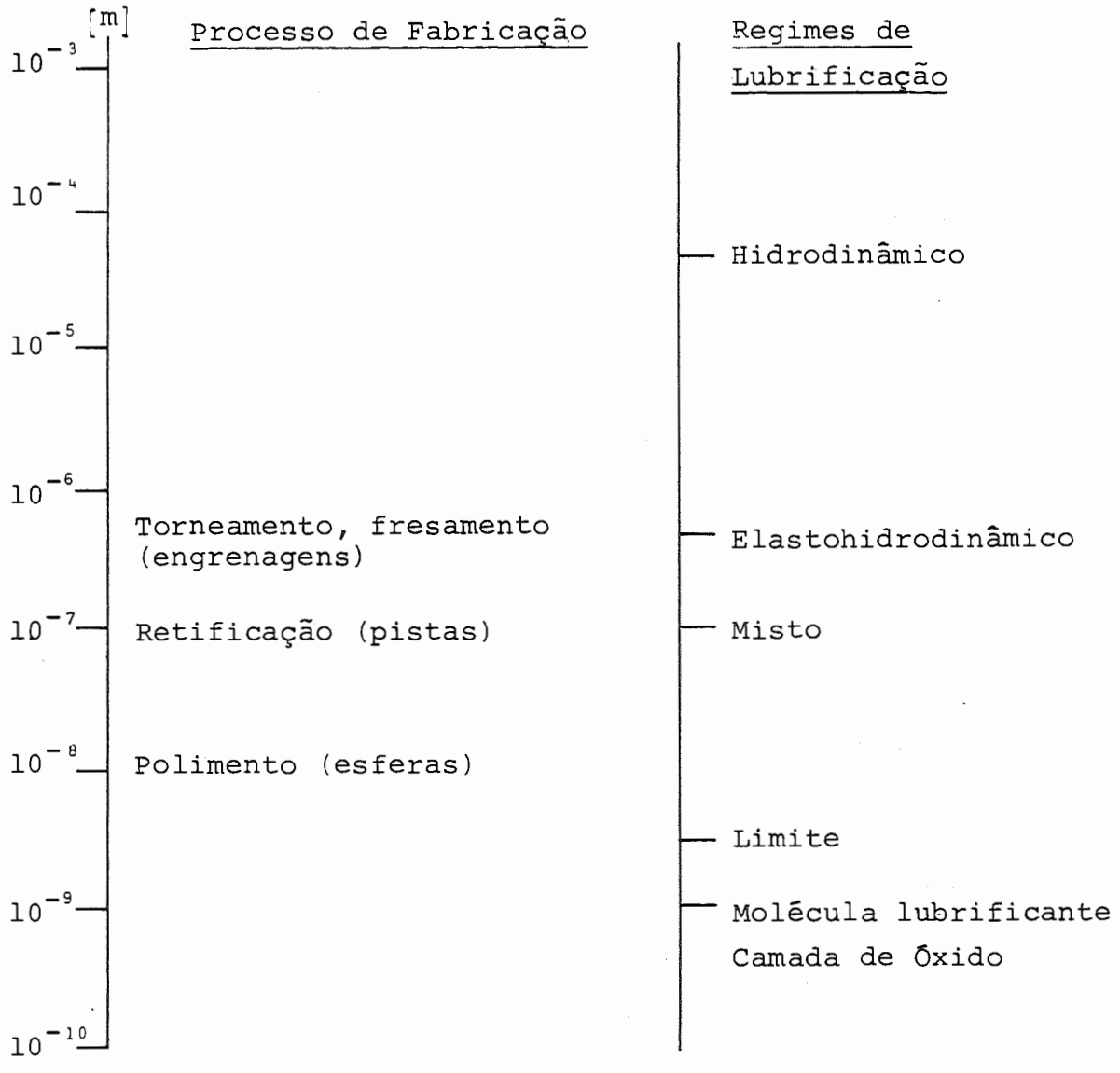


Figura 3.1 - Os regimes de lubrificação e a escala de dimensões típicas de qualidades superficiais.

4 - TRANSIÇÃO ENTRE OS REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

Convém relacionar a transição de um regime de lubrificação para outro com a relação admensional da espessura do filme definida como:

λ = relação da espessura do filme

$$\lambda = \frac{\text{espessura efetiva do filme}}{\text{rugosidade superficial (c.l.a.)}}$$

4.1- Lubrificação com Filme de Fluido

Os filmes lubrificantes são normalmente muitas vezes mais espessos que a rugosidade superficial medida na escala c.l.a.. As propriedades físicas do lubrificante prescrevem o comportamento do contato e os efeitos superficiais são inteiramente despresíveis.

A espessura do filme normalmente excede 10^{-6}m e a relação da espessura do filme é acima de 10 podendo atingir até 100. Filmes desta espessura são claramente insensíveis às reações químicas nas camadas superficiais de proporções moleculares.

4.2- Lubrificação Elastohidrodinâmica

A distorção elástica local dos sólidos proporcionam filmes de fluidos coerentes e a interação das asperidades é evitada. Para contatos normais a espessura do filme é da ordem de 10^{-7}m a 10^{-6}m e a relação da espessura do filme é maior que 4 ou 5.

4.3- Lubrificação Mista

O comportamento do contato é governado por uma mistura de efeitos "limites" e de "filme de fluido". Pode ocorrer algum contato entre asperidades e a interação tem lugar entre camadas de filmes lubri

ficantes limites de proporções mono ou multi-moleculares, ao passo que uma ação parcial da lubrificação com filme de fluido se desenvolve no espaço entre os sólidos.

Se a espessura efetiva do filme for calculada baseando-se na ação elastohidrodinâmica ou na de filme de fluido normal entre as superfícies lisas obtém-se valores da ordem de 5×10^{-8} a 10^{-6}m e uma relação de espessura de filme entre 1 a 5.

4.4- Lubrificação Limite

A interação superficial entre as camadas mono ou multi-moleculares dos lubrificantes limite e as superfícies sólidas dominam a operação do contato. Os efeitos do filme de fluido são desprezíveis e existe um considerável contato entre asperidades. O comportamento com relação ao atrito é semelhante àquele encontrado no atrito sêco entre sólidos.

Os filmes superficiais variam em espessura de 5×10^{-9} a 10^{-8}m e a relação da espessura do filme é menor que a unidade.

Os regimes de lubrificação discutidos são ilustrados na Figura 4.1 e a relação entre os coeficientes de atrito e a relação da espessura do filme é mostrada na Figura 4.2.

5 - LEITURA COMPLEMENTAR

CAMERON, A. - Basic Lubrication Theory. Ellis Horwood Limited. 1976.

_____ - Principles of Lubrication. Longmans. 1966.

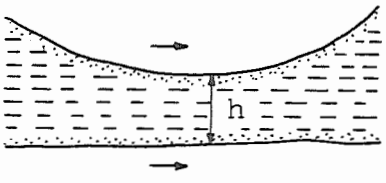
HALLING, J. (Edit.) - Principles of Tribology. The McMillan Press LTD. 1975.

MOORE, D.F. - Principles and Applications of Tribology. Pergamon Press. 1975.

FULLER, D.D. - Theory and Practice of Lubrication for Engineers. John Wiley & Sons. 1956.

ENGINEERING SCIENCE PROJECT - TRIBOLOGY. MacMillan Education. 1974.

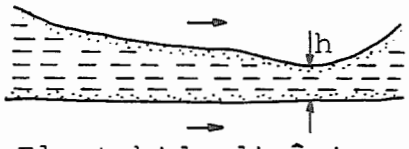
HALLING, J. - Introduction to Tribology. Wykeham Publications LTD. 1976.



Hidrodinâmica

$\lambda > 10 \sim 100$

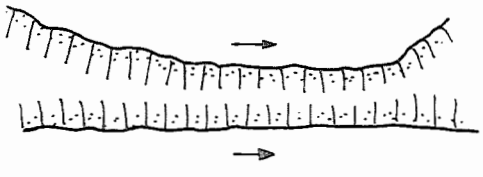
$h > 10^{-6}$ m



Elastohidrodinâmica

$\lambda = 4-10$

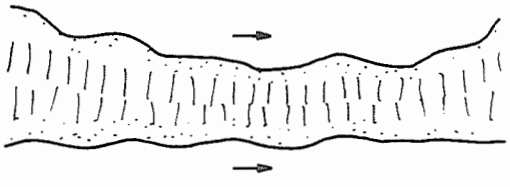
$h = 10^{-7} \sim 10^{-6}$ m



Mista

$\lambda = 1 \sim 5$

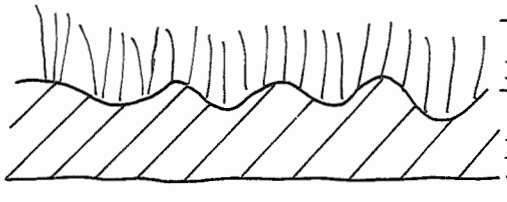
$h = 10^{-8} \sim 10^{-6}$ m



Limite

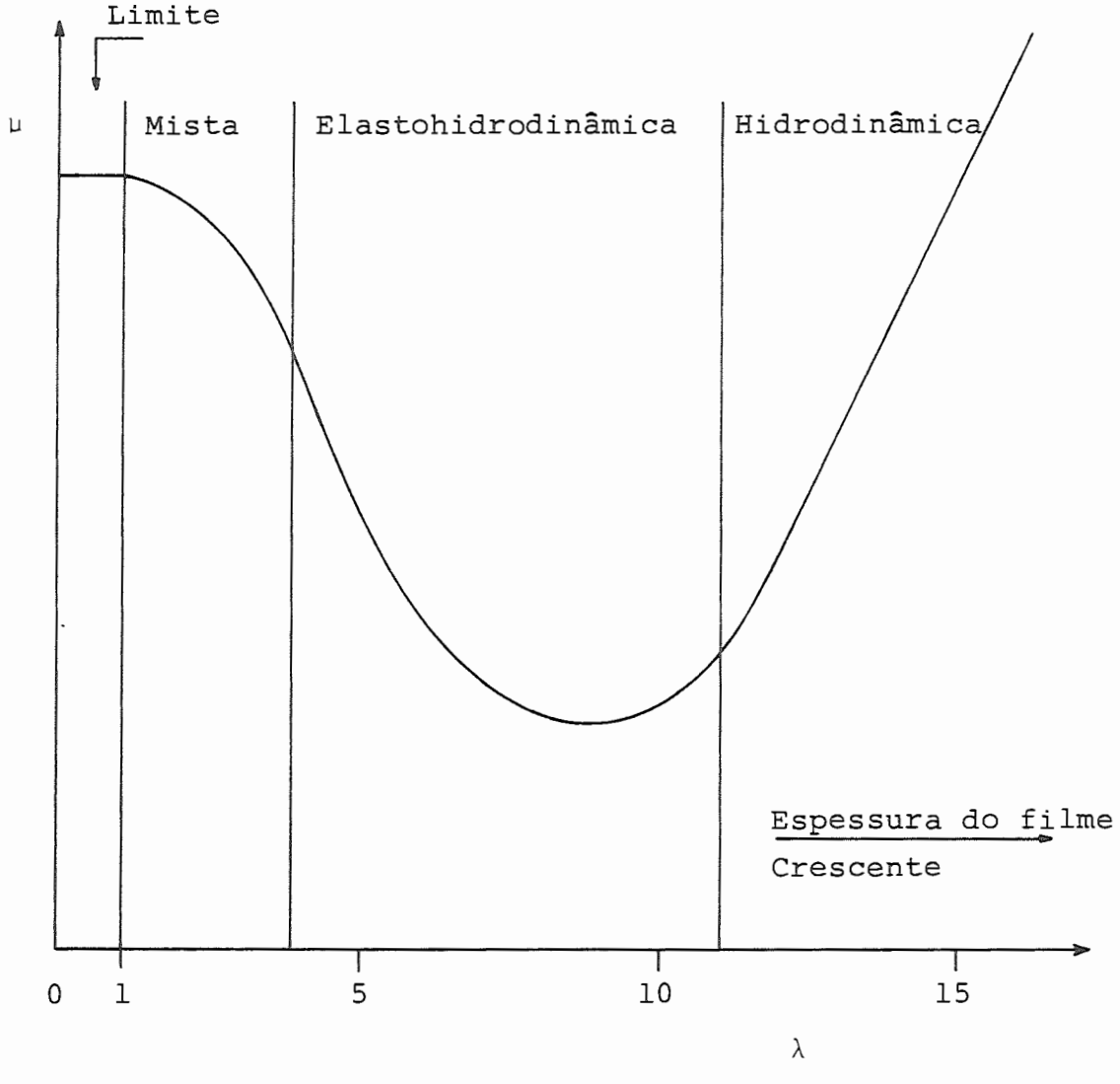
$\lambda < 1$

$h = 10^{-9} \sim 10^{-8}$ m



Dimensões típicas das películas superficiais

Figura 4.1 - Os regimes de lubrificação



$$\lambda = \frac{\text{espessura efetiva da película}}{\text{rugosidade superficial (c.l.a.)}}$$

Figura 4.2 - Variação do coeficiente de atrito com a relação da espessura da película.