



ESCOLA SUPERIOR AGRÁRIA
INSTITUTO POLITÉCNICO DE CASTELO BRANCO

Introdução à Manutenção



Amândio Marques Jorge Ginja



ESCOLA SUPERIOR AGRÁRIA
INSTITUTO POLITÉCNICO DE CASTELO BRANCO

Introdução à Manutenção

Amândio Marques Jorge Ginja

1993

TÍTULO:
Introdução à Manutenção

AUTOR:
Amândio Marques Jorge Ginja

EDIÇÃO:
Registo nº
Tiragem - 500 exemplares
Instituto Politécnico - Escola Superior Agrária de Castelo Branco
Rua S. João de Deus, 25 - 3º
6000 CASTELO BRANCO

CAPA:
Tomás Monteiro

ARRAJO GRÁFICO, COMPOSIÇÃO E IMPRESSÃO:
Centro de Recursos da Escola Superior Agrária de Castelo Branco
Quinta da Srª de Mércoles
6000 CASTELO BRANCO

Prefácio

Esta publicação contém um conjunto de informações extramamente importantes para o aluno se aperceber dos assuntos relevantes que rodeiam o mundo actual da máquina. As novas tecnologias têm permitido exigir das máquinas melhores condições de serviço com elevados níveis de fiabilidade.

Assim, temos de arranjar forma de conseguirmos uma inspecção continuada dos mais diversos equipamentos de modo a obtermos valores de rendimentos significativos e consequentemente concretizarmos custos de produção baixos.

Actualmente falar de **Manutenção** é falar de **Chumaceiras de rolamento** (escolha da chumaceira de rolamento, tipos de montagem, desmontagem, tipos de vedação, etc.), de **Lubrificação** (tipo de lubrificante, quantidade de lubrificante, períodos de lubrificação, etc.), de **Equipamentos** que nos permitam controlar, de uma forma contínua, as condições de funcionamento das máquinas (termómetros, barómetros, analisadores de vibração, etc.), etc.. No fundo temos de ter um conjunto de conhecimentos diversificados para podermos intervir numa máquina de forma a obter custos e tempos de paragem baixos.

Os temas abordados nestas folhas de **Introdução à Manutenção** procuram não só fornecer alguns desses conhecimentos mas também sensibilizar o aluno para alguns aspectos relacionados com a Manutenção.

Penso que os conceitos apresentados nestas folhas vão ser de uma importância fundamental tanto para o aluno de hoje como para o técnico de amanhã.

V. Figueiredo dos Santos

Agradeço à Prof.^a Leopoldina Rosa a oportunidade que me deu para a realização deste trabalho, bem como o estímulo durante a elaboração do mesmo. Agradeço ainda à Fátima Pires pela incansável dedicação e paciência, sem a qual este trabalho não seria possível.

Resumo

O presente trabalho está dividido em dois grandes capítulos. No primeiro é apresentada uma introdução à Manutenção, enquanto que no segundo é feita referência aos princípios básicos da lubrificação através duma introdução à mesma.

No primeiro capítulo é feita uma primeira abordagem de algumas questões de carácter mais geral no âmbito da manutenção, com especial ênfase para alguns conceitos teóricos considerados basilares para a análise da problemática que envolve a mesma. De seguida, é feita referência aos custos da manutenção como um factor de extrema importância na gestão da manutenção, realçando, de modo particular, as causas mais influentes no crescimento/diminuição desses custos.

A dar continuidade à abordagem dos conceitos e factores mais influentes no êxito da manutenção, levando em consideração os seus objectivos, é feita alusão às vantagens da Manutenção Preventiva, nomeadamente aquela que se baseia na inspecção contínua do equipamento, através da análise da repercussão da mesma nos custos da manutenção.

No segundo capítulo são apresentados alguns conceitos teóricos importantes relacionados com a lubrificação. Assim, este começa por perspectivar a necessidade da lubrificação na manutenção em geral, para de seguida, e antes de entrar em questões de carácter mais prático, apresentar algumas noções teóricas fundamentais ao estudo dos múltiplos processos de lubrificação, fazendo então referência aos regimes de lubrificação por película espessa e fina, respectivamente, após os quais é apresentada uma breve nota sobre a teoria Elastohidrodinâmica.

A terminar o segundo capítulo é feita uma abordagem simples sobre os fluidos lubrificantes, principalmente no que diz respeito às suas propriedades e aplicações mais relevantes, dada a importância que estas assumem em todo o processo de lubrificação.

ÍNDICE

Resumo

Índice

Lista de Figuras

1 - Introdução à Manutenção	1
1.1 - Princípios Gerais da Manutenção	1
1.1.1 - A Necessidade da Manutenção	1
1.1.2 - Objectivos da Manutenção	2
1.1.3 - Ciclo da Manutenção	3
1.2 - Custos da Manutenção	7
1.3 - Manutenção Preventiva	8
1.3.1 - Definições	8
1.3.2 - Manutenção Preventiva Indirecta (Condition Monitoring)	11
1.3.3 - Efeitos Económicos da Manutenção Preventiva	15
2 - Introdução à Lubrificação	19
2.1 - A Necessidade da Lubrificação	19
2.2 - Algumas Noções Teóricas sobre Lubrificação	21
2.2.1 - Introdução	21
2.2.2 - Regime de Lubrificação por Película Espessa	23

2.2.2.1 - Lubrificação Hidrodinâmica	24
2.2.2.2 - Lubrificação por Esmagamento de Película	27
2.2.2.3 - Lubrificação Hidrostática	28
2.2.3 - Regime de Lubrificação por Película Fina	30
2.2.4 - Teoria Elastohidrodinâmica	33
2.3 - Lubrificantes	34
2.3.1 - Introdução	34
2.3.2 - Óleos Minerais	35
2.3.2.1 - Obtenção dos Óleos Minerais	35
2.3.2.2 - Principais Características Físicas e Químicas	35
2.3.2.3 - Aditivos	41
2.3.3 - Massas Lubrificantes	44
2.3.3.1 - Obtenção das Massas Lubrificantes	44
2.3.3.2 - Principais Características das Massas Lubrificantes	45
2.3.4 - Outros Lubrificantes	47
2.3.5 - Aplicações dos Lubrificantes	48
Referências	51

Lista de Figuras

Fig. 1	- Consequências directas da manutenção adequada	3
Fig. 2	- Ciclo da manutenção	5
Fig. 3	- Tipos de manutenção	9
Fig. 4	- Tipos de manutenção preventiva	10
Fig. 5	- Tipos de inspecção	13
Fig. 6	- Variação da taxa de avarias com o tempo de serviço	14
Fig. 7	- Evolução dos custos totais da manutenção preventiva periódica	15
Fig. 8	- Influência da inspecção nos custos totais da manutenção preventiva	16
Fig. 9	- Símbolo oficial da tribologia	20
Fig. 10	- Perfil ampliado duma superfície	22
Fig. 11	- Regimes de lubrificação	23
Fig. 12	- Diagrama de velocidades	24
Fig. 13	- Evolução da velocidade e da pressão na lubrificação hidrodinâmica	25
Fig. 14. a)	- Chumaceira de impulso de almofadas inclinadas	26

Fig. 14. b) - Lubrificação hidrodinâmica numa chumaceira de impulso de almofadas inclinadas	27
Fig. 15 - Lubrificação por esmagamento de película	27
Fig. 16 - Esmagamento de película num casquilho de cavilhão	28
Fig. 17 - Lubrificação hidrostática num caso típico numa chumaceira de casquilho	29
Fig. 18 - Sistemas de lubrificação por efeito hidrostática	29
Fig. 19 - Efeito dos lubrificantes sólidos com estrutura lamelar	31
Fig. 20 - Efeitos contacto entre superfícies	32
Fig. 21 - Lubrificação segundo a teoria elastohidrodinâmica	34
Fig. 22 - Perfil de velocidades numa película de lubrificante	36
Fig. 23 - Diagrama de velocidades para fluidos com viscosidades diferentes	37
Fig. 24 - Variação da Viscosidade dinâmica com a pressão e temperatura	38
Tab. 1 - Valores resultantes numa boa aplicação tribológica	21
Tab. 2 - Atrito e desgaste para o caso de várias combinações de materiais	21
Tab. 3 - Tabela de conversão para diferentes unidades de medida da viscosidade	39
Tab. 4 - Aplicação de aditivos	43
Tab. 5 - Aplicações de massas lubrificantes	45
Tab. 6 - Classificação NLGI da consistência das massas lubrificantes	46
Tab. 7 - Áreas de aplicação dos diversos lubrificantes	49
Tab. 8 - Principais requerimentos de alguns órgãos de máquinas para uma boa aplicação tribológica	49

1- INTRODUÇÃO À MANUTENÇÃO

1.1 - Princípios Gerais da Manutenção

1.1.1 - A Necessidade da Manutenção

A manutenção, de uma forma ou de outra, é necessária sempre que se usa equipamento técnico. De facto, a frequência dos trabalhos de manutenção pode ser maior ou menor, no entanto, é impossível operar com uma máquina indefinidamente, sem qualquer manutenção, com o risco de que, mais cedo ou mais tarde, graves avarias venham a suceder, obrigando à paragem da máquina, com as intervenções na mesma bastante morosas e complexas que se podem traduzir em avultados prejuízos, levando por vezes ao fracasso de uma determinada actividade.

As exigências da manutenção numa exploração agrícola diferem bastante de caso para caso, dependendo fundamentalmente:

- ⇨ do tipo de exploração;
- ⇨ da dimensão da própria exploração;
- ⇨ da qualidade e quantidade do equipamento técnico do processo de produção.

1.1.2 - Objectivos da Manutenção

Toda a manutenção que se faça numa determinada exploração agrícola deverá, por razões económicas e de segurança, ser realizada do modo, o mais adequado possível. A manutenção feita em excesso acarreta custos desnecessários, e uma manutenção insuficiente poderá conduzir a acidentes, perdas de produção ou reparações muito demoradas e dispendiosas. Todo o trabalho de manutenção deverá então ser organizado no sentido de se atingirem os índices de rendimento e segurança requeridos, a um menor custo.

Este pressuposto terá como consequência imediata:

- ⇨ uma redução da necessidade de manutenção, diminuindo os elevados custos que esta comporta;
- ⇨ uma maior vida útil da máquina, valorizando o investimento inicial que permite uma mais rápida angariação de fundos para a aquisição de equipamento novo;
- ⇨ uma redução das perdas de produção não só pelo maior rendimento da máquina como também pela diminuição das paragens na produção motivadas por intervenções no equipamento;
- ⇨ um menor consumo de energia, traduzindo-se numa redução na saída de capitais.

Para além do interesse económico subjacente à organização dos trabalhos de manutenção, existem outros factores que são de igual modo desejáveis:

- ⇒ o melhoramento das condições de trabalho, que contribuem para um aumento de produção, e uma redução da fadiga;
- ⇒ o melhoramento das condições de segurança.

A fig. 1 mostra de forma resumida o percursos das consequências directas da manutenção adequada.

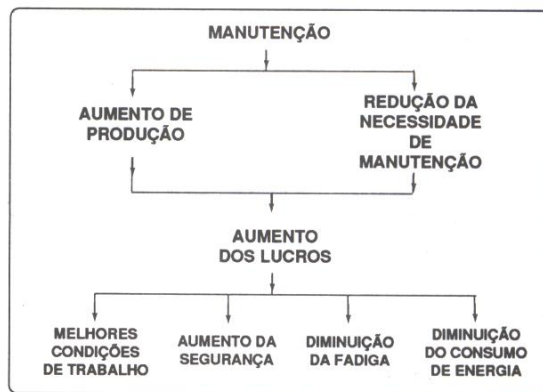


fig. 1 - Consequências directas da manutenção adequada.

1.1.3 - Ciclo da Manutenção

A manutenção é caracterizada por um conjunto de trabalhos dos mais diversos sectores de actividade. Alguns destes trabalhos podem ser representados por:

⇨ **Serviços Administrativos** - Parte-se do princípio de que qualquer manutenção necessita, em maior ou menor escala, duma intervenção de carácter administrativo. Estes serviços são responsáveis pela coordenação e activação dos diversos sistemas intervenientes na organização da manutenção e assumem uma importância extrema em todo o processo quando a manutenção tem um grande peso na economia da exploração.

⇨ **Trabalhos inerentes à manutenção preventiva**

⇨ **Trabalhos inerentes à manutenção correctiva**

⇨ **Trabalhos relativos a modificações** - Com esta acção pretende-se adaptar o equipamento de modo a serem alcançados maiores e melhores índices de produtividade, para uma menor necessidade de manutenção e facilidade de execução da mesma.

⇨ **Trabalhos relativos a substituições** - Em muitas situações, em função do tipo de exploração ou de actividade, a competitividade está fortemente dependente da substituição do equipamento antigo pelo moderno, cabendo ao departamento de manutenção a importante tarefa de ir integrando novas tecnologias no processo de produção.

Levando em consideração a diversidade dos trabalhos de manutenção e a interdependência dos mesmos, poderá constatar-se que a eficiência duma intervenção de manutenção dependerá em grande parte da organização da mesma.

A fig. 2 ilustra o ciclo da Manutenção no qual toda a organização da mesma deverá ser fundamentada.

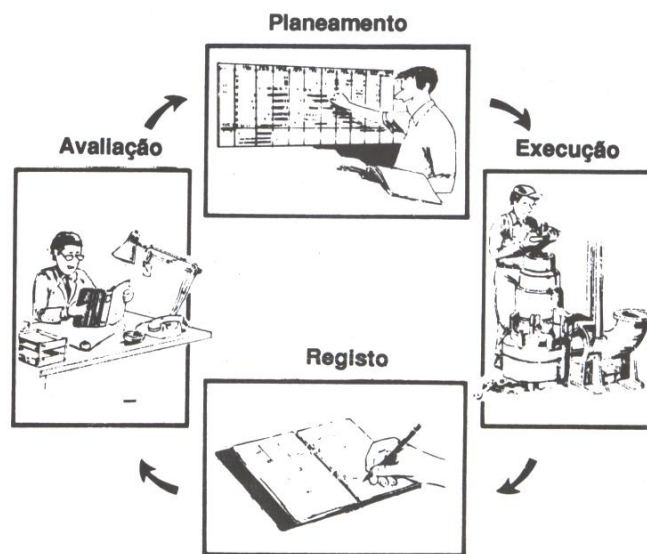


fig. 2 - Ciclo da Manutenção

Planeamento: - Normalmente, quando a manutenção é sistematicamente insuficiente, o planeamento é quase sempre inadequado ou mesmo inexistente. Nestas situações, a manutenção é feita, quando já não é possível esperar mais, na forma de reparações críticas muito mais dispendiosas que os custos resultantes duma manutenção preventiva.

Esta disparidade de custos deve-se, em parte, ao facto das intervenções não serem controladas e executadas no momento certo, levando em

consideração as perdas de produção, e também porque as reparações nestas circunstâncias são de grande dimensão, obrigando a muitas substituições de peças que poderão não existir em armazém, mão de obra especializada e horas extraordinárias dos trabalhadores.

Um meio de evitar estes custos elevados, consiste em planear sistematicamente a manutenção. Um planeamento adequado permite fazer a intervenção no momento certo, na forma mais correcta, mantendo um controlo da situação no que diz respeito a custos de mão de obra e gestão de stocks.

Refira-se que todo o planeamento da manutenção está fortemente dependente dos períodos correspondentes a menores índices de produção, uma vez que os custos directos da manutenção são geralmente muito inferiores aos custos devidos a perdas de produção (custos indirectos da manutenção).

Execução - Será o conjunto de tarefas que se caracterizam pela intervenção directa no equipamento. Esta, mesmo quando sendo uma reparação crítica resultante duma avaria imprevista, poderá ser realizada de forma mais correcta e a um menor custo se for minimamente planeada. Ou seja, verificar por exemplo quais as ferramentas, instrumentos e peças de substituição necessária, etc.

Registo - Um dos factores mais importantes de que depende o êxito da manutenção é o uso da experiência no planeamento da mesma. Neste sentido, é importante registar o conjunto de dados relativos a cada intervenção, nomeadamente: uma descrição dos traços mais significativos da avaria; o que foi feito para a corrigir; quando foi realizada; quem a efectuou e, de um modo geral, todo o conjunto de notas que se julguem importantes para o futuro planeamento duma nova intervenção de manutenção.

Avaliação - Não é mais do que a necessária análise dos registos relativos a anteriores intervenções que antecedem a execução do planeamento duma intervenção futura.

1.2 - Custos da Manutenção

A manutenção, mesmo a mais correcta e adequada às circunstâncias, acarreta elevados e muito diversificados custos. A identificação destes como custos de manutenção não poderá ser universal, antes pelo contrário, dependerá fortemente de caso para caso.

Alguns custos normalmente identificados como custos de manutenção poderão ser subdivididos em custos directos e indirectos.

Custos Directos da Manutenção - Como o próprio nome indica, estes custos resultam directamente da manutenção e são normalmente especificados por:

- Custos dos salários dos trabalhadores directamente intervenientes na manutenção;
- Custos relativos à aquisição de material diverso como oleos de lubrificação, tintas, peças de substituição, ferramentas e todo o material directamente ligado às necessidades da manutenção;
- ⇒ Custos administrativos;
- ⇒ Custos resultantes da aquisição de equipamento de apoio à manutenção;
- ⇒ Custos da mão de obra especializada, contratada para determinadas tarefas que necessitam de um conhecimento específico ou quando o grau de responsabilidade da qualidade do trabalho é elevado.

Custos Indirectos da Manutenção: - São todos aqueles que não resultam directamente dos encargos da manutenção.

São normalmente considerados como custo indirecto de manutenção, os custos relativos a perdas de produção, motivados por paragens no processo de produção, devido aos trabalhos de manutenção.

Estes custos representam normalmente a maior parte do montante dos custos da manutenção, ultrapassando por vezes significativamente os custos directos da manutenção.

1.3 - Manutenção Preventiva

1.3.1 - Definições

A mais rudimentar e possivelmente a mais antiga forma de manutenção caracteriza-se por uma contínua observação da máquina, intervindo à medida que vão surgindo anomalias.

Este tipo de manutenção exige muita disponibilidade do trabalhador e obriga, passado algum tempo, a possíveis substituições de equipamento tornando-se, por isso, mais dispendiosa:

- ⇨ ao nível do tempo perdido com a máquina, em detrimento das restantes actividades;
- ⇨ ao nível do rendimento da máquina que devido às paragens constantes vão aumentar as perdas de produção;
- ⇨ ao nível dos custos das reparações que, normalmente críticas, são bastante dispendiosas e demoradas.

Este tipo de manutenção é denominado de manutenção correctiva uma vez que toda a intervenção é feita para corrigir as avarias que vão surgindo.

Actualmente a manutenção baseia-se fundamentalmente numa intervenção metódica através dum planeamento sistemático e duma inspecção contínua que permita analisar e evitar uma potencial avaria.

Este é realmente o método mais seguro de garantir um funcionamento contínuo das máquinas exigindo simultaneamente um menor tempo gasto em tarefas de manutenção por parte do trabalhador.

A fig. 3 ilustra os dois tipos de manutenção.

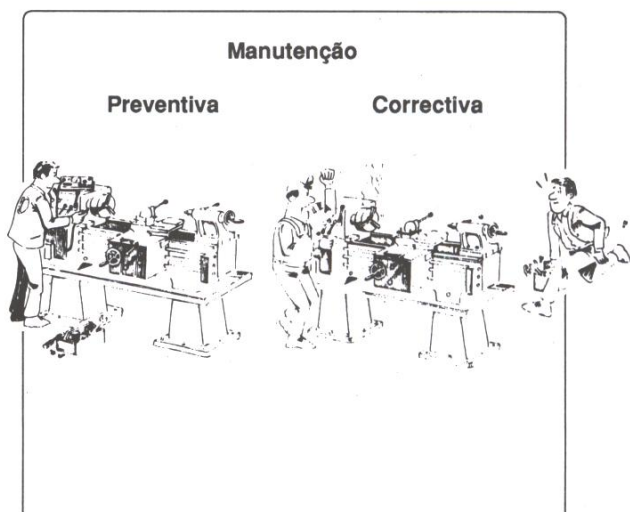


fig. 3 - Tipos de Manutenção

A manutenção preventiva pode ser subdividida em manutenção preventiva directa e indirecta (Condition Monitoring).

A fig. 1.4 ilustra as situações mais características da manutenção preventiva.

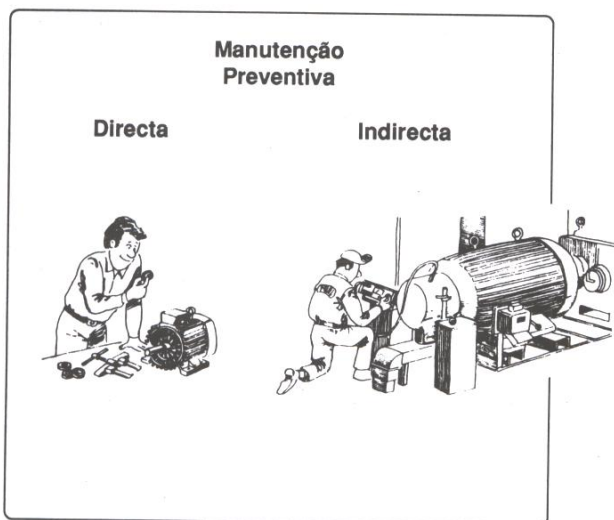


fig. 4 - Tipos de Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva directa baseia-se num conjunto de medidas caracterizadas por uma intervenção directa no equipamento, com objectivo de retardarem o surgimento de avarias.

Algumas das tarefas mais comuns realizadas segundo um plano de intervenção da manutenção periódico são:

- Limpeza dos órgãos da máquina
- Lubrificação do equipamento
- Substituição de peças

Sendo caracterizada por uma intervenção directa no equipamento, a manutenção preventiva directa necessita, por vezes, de interromper o

funcionamento da máquina. Estas paragens vão traduzir-se em perdas de produção que agravam ainda mais os já elevados custos da manutenção. Por esta razão, é necessário analisar o funcionamento da máquina através da recolha de dados, de modo a ser possível a execução dum planeamento adequado de toda a intervenção de manutenção. Ou seja, é necessário fazer uma manutenção preventiva indirecta.

A manutenção Preventiva Indirecta (Condition Monitoring) não é mais do que o conjunto de operações baseadas fundamentalmente na inspecção e cujo objectivo é determinar a eventual necessidade de execução da manutenção preventiva directa.

1.3.2 - Manutenção Preventiva Indirecta (Condition Monitoring)

Em muitas situações é usual fazer-se a manutenção preventiva periódicamente, resultando quase sempre numa intervenção directa na máquina. Nestes casos, a intervenção é executada normalmente antes do necessário, a fiabilidade do equipamento é perdida e a vida das peças de substituição prevista é ignorada. Ou seja, os custos da manutenção vão aumentar significativamente.

Para que os custos da manutenção preventiva não sejam exagerados, é então necessário que esta se faça no momento mais adequado e unicamente quando necessário, levando sempre em consideração o estado de funcionamento da máquina e das peças que a compõem. Para que este objectivo seja atingido, é necessário acompanhar com algum rigor a evolução do estado de funcionamento da máquina através da recolha e análise dos dados mais representativos.

A manutenção preventiva indirecta (Condition Monitoring) permite, através do uso da inspecção continua ao equipamento, detectar atempadamente as potenciais avarias e acompanhar a sua evolução, de modo a que o planeamento da mesma possa resultar numa intervenção correcta no momento mais adequado.

A inspecção compreende um conjunto de técnicas essencialmente de natureza experimental cuja finalidade é detectar de forma qualitativa e quantitativa o nível de desempenho da máquina ou do componente em análise.

Na prática, a inspecção pode ser subdividida em:

- Inspeção Subjectiva
- Inspeção Objectiva

Inspeção Subjectiva: É normalmente feita no primeiro estágio do exame da máquina e consiste na utilização dos sentidos. Nestas situações, o exame não revelará muito mais que os defeitos relativamente grandes que se encontram fáceis de inspecionar.

Inspeção Objectiva: Através da utilização de princípios físicos bem conhecidos, desenvolveram-se vários métodos de inspeção objectiva. Utilizando por vezes equipamento bastante sofisticado, todos estes métodos têm como objectivo fornecer informação sobre a qualidade do material e, simultaneamente, têm como característica comum o facto de não alterarem ou danificarem as peças.

A fig. 5 ilustra os dois tipos de inspecção.

A escolha do método de inspecção mais adequado depende em muito do tipo de defeito que se pretende detectar, assim como da geometria e dimensões das peças que se quer examinar. No entanto, e para que o mesmo método seja utilizado de maneira adequada, é fundamental prever antecipadamente quais os modos mais prováveis e críticos que poderão conduzir à ocorrência duma avaria, e, a partir desta informação, ser capaz de determinar os tipos de defeitos potencialmente perigosos, bem como das suas dimensões admissíveis. Esta tarefa compete em primeira análise ao projectista do equipamento que deverá especificar,

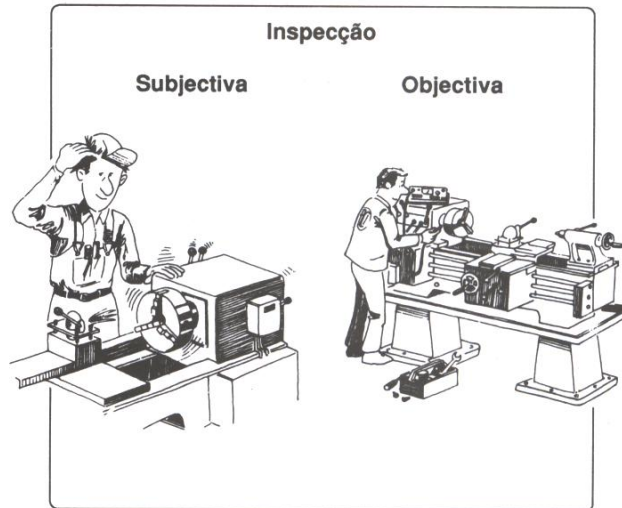


fig. 5 - Tipos de inspeção

de forma clara e da maneira mais detalhada possível, quais os defeitos inaceitáveis, assim como o método mais adequado para a detecção dos mesmos.

Em resumo, pode concluir-se que para se ter uma aplicação bem sucedida de um método de inspeção objectiva, o sistema de detecção e os procedimentos a seguir devem ser adequados ao tipo de defeito a detectar, o operador deve possuir formação e experiência suficientes e os níveis de aceitação de defeitos devem ser criteriosamente escolhidos de modo a se poder distinguir o que é aceitável do que não o é.

Na fig. 6 está representada a curva de variação da frequência de ocorrência de avarias com o tempo.

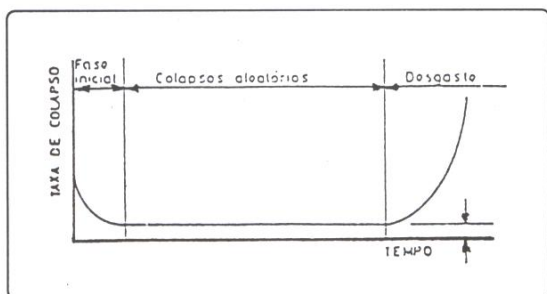


fig. 6 - Variação da taxa de avarias com o tempo de serviço.

Nesta curva distinguem-se três fases:

- ⇒ Fase inicial, "Juventude": taxa elevada de avarias com acentuada diminuição ao longo do tempo; avarias devidas a erros cometidos na fase de concepção e (ou) construção;
- ⇒ Fase intermédia, "Maturidade": ocorrência aleatória de avarias; taxa de falhas aproximadamente constantes;
- ⇒ Fase final, "Velhice": aumento progressivo da taxa de ocorrência de avarias, normalmente atribuída a fenómenos de degradação (fadiga, corrosão, desgaste).

Dum modo geral podem enumerar-se como se seguem as causas das avarias em equipamentos mecânicos:

- 1 - Deficiências de projecto
- 2 - Deficiências na selecção dos materiais
- 3 - Imperfeições (defeitos) no material
- 4 - Sobrecargas introduzidas em serviço
- 5 - Procedimentos inadequados de manutenção e reparação
- 6 - Factores ambientais

1.3.3 - Efeitos Economicos da Manutenção Preventiva

O aumento das acções de manutenção preventiva leva a dois efeitos contrários: por um lado, aumenta o rendimento das máquinas, diminui as perdas de produção, devidas a paragens originadas por avarias, e reduz os custos das reparações; por outro lado, aumenta os custos de mão de obra, materiais, bem como as perdas de produção por exagero de intervenção de manutenção.

A fig. 7 mostra a evolução dos custos totais da manutenção preventiva em função das horas de trabalho/homem.

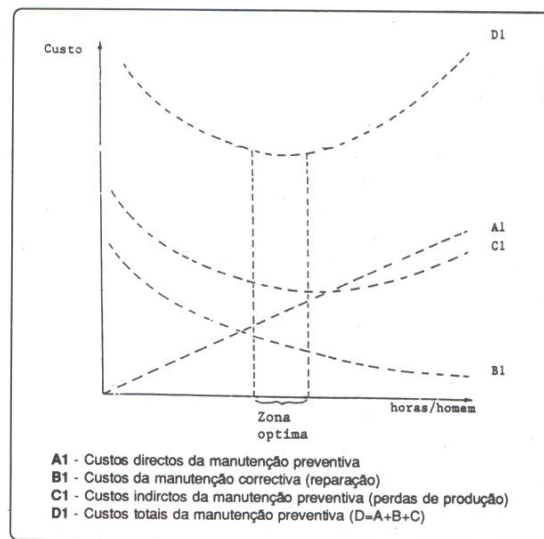


fig. 7 - Evolução dos custos totais da manutenção Preventiva Periódica

A grande conclusão que se pode tirar da análise ao gráfico da fig. 7 é a de que os custos totais da manutenção preventiva aumentam quando esta é feita em excesso. Neste sentido, é vantajoso aceitar alguma manutenção correctiva para se garantirem menores custos.

Refira-se que em determinadas actividades, como a industria aeronáutica, a manutenção preventiva é realizada intensivamente, mais do que necessário, técnica e economicamente, dada a importância que assume nestes casos a segurança das pessoas.

Como foi referido anteriormente no ponto 1.3.2, a inspeção permite um melhor conhecimento da natureza e evolução de avarias, facilitando o planeamento da manutenção e uma maior economia nos custos da mesma.

A fig. 8 mostra a influencia da inspeção (Condition Monitoring) na evolução dos custos totais da manutenção preventiva.

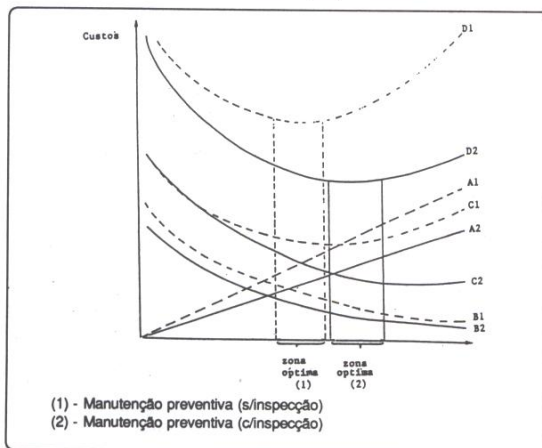


fig. 8 - Influência da inspeção nos custos totais da manutenção preventiva

- A** - Se assumirmos que a inspecção aumenta o numero de horas/homem de trabalho de manutenção, os custos relativos a estas serão compensados pela redução no numero de intervenções de manutenção e no numero de peças de substituição. Este facto irá traduzir-se em menores custos directos da manutenção preventiva baseada na inspecção, relativamente aos custos da manutenção preventiva periódica.
- B** - Os custos da manutenção correctiva, pelo facto da inspecção reduzir a probabilidade de avarias, irão também ser menores.
- C** - Dado que a inspecção não afecta o ritmo de produção, e o numero de paragens é reduzido quando a mesma é feita, então os custos indirectos devidos a perdas de produção serão menores.
- D** - Finalmente, os custos totais da manutenção vêm consideravelmente menores como resultado das considerações em A, B, e C.

No entanto, refira-se que apesar dos menores custos da manutenção baseada na inspecção, são necessárias mais horas/homem de trabalho de manutenção para fazer face às tarefas de inspecção contínua ao equipamento

Também se verifica, nesta situação, a conveniência em manter alguma manutenção correctiva para que os custos totais da manutenção preventiva baseada na inspecção sejam mínimos.

2. - INTRODUÇÃO À LUBRIFICAÇÃO

2.1 - A Necessidade da Lubrificação

A utilização simultânea de uma tecnologia mais avançada de processos contínuos, associada ao facto dos fenómenos ligados à lubrificação terem sido durante muito tempo depreciados no projecto de órgãos de máquinas, originou, na década de 60 e nos países mais industrializados, um agravamento significativo no número de avarias essencialmente provocadas pelo desgaste, ou por causas a ele associadas.

Os elevados custos originados pelas frequentes avarias acima referidas estiveram na origem do surgimento duma nova ciência: a TRIBOLOGIA, definida desde então como "Ciência e tecnologia das superfícies interactuantes em movimento relativo e matérias e métodos com elas relacionadas"

A fig. 9 mostra o símbolo oficial da Tribologia



Fig. 9 - Símbolo oficial da Tribologia.

Grande parte das matérias que estão incluídas na Tribologia dizem respeito à Lubrificação, no entanto, o âmbito da primeira é mais vasto, não está condicionado a uma redução do atrito como acontece na Lubrificação. De facto, o termo Lubrificação traduz mal um fenómeno mais geral que é o da transferência de força de uma superfície móvel para outra; transferência essa que pode estar associada quer a um atrito elevado, no caso de travões, embraiagens, transportadores, ou a um atrito tão reduzido quanto possível, como acontece nas chumaceiras.

Enquanto, geralmente, se procura reduzir o desgaste a um mínimo, dado que este representa uma perda de eficiência e de material, no que diz respeito ao atrito, em certos casos procura-se a sua redução, dado que representa uma perda de energia, e noutros procura-se que este seja elevado, como acontece nos travões.

Do que foi referido anteriormente, depreende-se que o principal objectivo da Tribologia não será mais do que uma redução das avultadas despesas verificadas, através dum controle simultâneo do atrito e do desgaste.

A tabela 1 mostra os valores relativos da economia obtida aquando duma correcta aplicação Tribológica em diferentes sectores, elaborado pelo Comité de Tribologia.

Economia de manutenção e em Substituição de Peças	45%
Redução de prejuízos causados por avarias	22%
Aumento da vida útil das máquinas	19%
Menores perdas por atrito	9%
Economias várias (Lubrificantes, mão-de-obra e investimentos)	5%

Tab 1 - Valores característicos de uma boa aplicação tribológica

As vantagens em economia apontadas são já por si suficientemente relevantes para justificarem a aplicação tribológica. No entanto, a detecção preventiva de avarias, ou a redução do seu número, conduz também a melhores condições de segurança no trabalho, valorizando ainda mais a presença da Tribologia no projecto e na manutenção das máquinas.

2.2 - Algumas Noções Teóricas Sobre Lubrificação

2.2.1 - Introdução

O contacto directo entre superfícies origina uma elevada força de atrito e um grande desgaste. Por esta razão, todos os órgãos que, de um modo geral, possuem superfícies ajustadas entre si e em movimento relativo são lubrificadas com o objectivo de se evitar ou minimizar o atrito e desgaste. Refira-se que embora a um elevado atrito esteja associado um grande desgaste, não é possível estabelecer uma relação simples entre ambos, como se pode concluir da análise da Tab. 2.

Materials	μ	Desgaste *
Aço macio com aço macio	0,62	157×10^3
PTFE com aço de ferramenta	0,18	2×10^3
Aço inoxidável com aço de ferramenta	0,53	3×10^3
Carboneto de tungsténio com Carboneto de Tung.	0,35	2

* Nota - as unidades são $10^{-12} \text{ cm}^3 / \text{cm}$

Tab. 2 - Atrito e Desgaste para o caso de várias combinações de material

Os valores apresentados permitem observar que ao valor mais baixo do coeficiente de atrito (μ) não corresponde o menor valor de desgaste e que a gama de variação do primeiro é muito menor que a verificada para o segundo.

A função da lubrificação não é mais do que interpor e manter entre superfícies móveis uma película com propriedades adequadas para reduzir o contacto entre elas, tendo simultaneamente um atrito interno bastante para que o consumo de energia seja mínimo. Existem, todavia, outros factores que podem contribuir não só para uma melhor lubrificação mas também para que o objectivo desta seja facilmente conseguido. Destes factores destacam-se a correcta escolha dos materiais das superfícies interactuantes, o modo como estas interactuam e o seu grau de acabamento. A este respeito, refira-se que as superfícies trabalhadas dos órgãos das máquinas apresentam uma superfície irregular, caracterizada por uma ondulação própria do funcionamento da máquina ferramenta utilizada na sua construção e por minúsculos "picos e vales" sobrepostos a estas mesmas ondas, como ilustra a fig. 10. Nota-se que as ondulações são expressas em décimas de milímetro enquanto as irregularidades menores são da ordem das milésimas de milímetro.

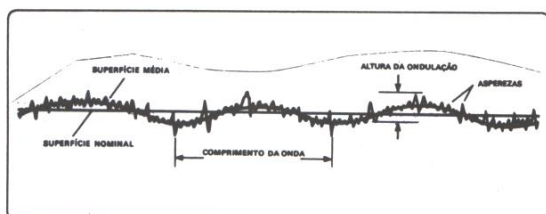


fig. 10 - Perfil ampliado duma superfície.

O êxito da lubrificação está dependente, fundamentalmente, do comportamento da película lubrificante quando sujeita a diferentes cargas e velocidades. Este comportamento, por sua vez, é função da espessura

da película de lubrificante relativamente à dimensão das irregularidades das superfícies e é caracterizado por dois regimes de lubrificação:

- ↔ a lubrificação por película espessa
- ↔ a lubrificação por película fina

A fig. 11 ilustra os dois referidos regimes de lubrificação

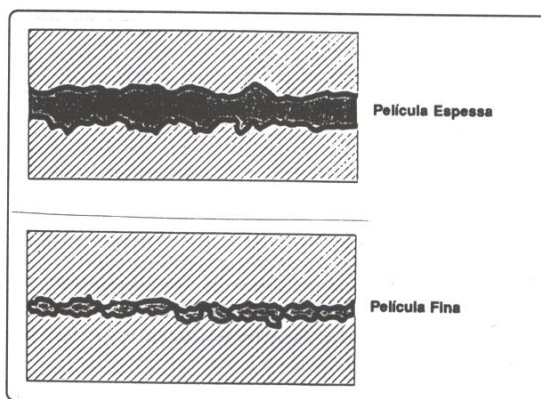


fig. 11 - Regimes de Lubrificação

2.2.2 - Regime de Lubrificação por Película Espessa

A lubrificação por meio de películas espessas é caracterizada por uma separação total das superfícies, não permitindo, portanto, qualquer desgaste. Por esta razão, este regime de lubrificação corresponde ao regime óptimo de lubrificação.

As películas espessas formam-se de três modos distintos:

- 1) - pelo movimento relativo de duas superfícies paralelas lubrificadas, na lubrificação hidrodinâmica;
- 2) - pelo movimento em determinadas condições de superfícies lubrificadas uma de encontro à outra, na lubrificação em esmagamento de película;
- 3) - por pressão de bombagem do fluido lubrificante entre superfícies que não se movem necessariamente uma em relação à outra, na lubrificação hidrostática.

Teoricamente, qualquer fluido, tanto líquido como gasoso, ou mesmo certos corpos semi-sólidos, como as massas lubrificantes, podem ser usadas em lubrificação por película espessa. No entanto, devido às suas propriedades, os óleos lubrificantes derivados do petróleo são mais adequados, relativamente a outras substâncias, à excepção de casos especiais.

2.2.2.1 - Lubrificação Hidrodinâmica

Consideram-se duas placas com uma película de lubrificante entre elas, em que uma das placas está a mover-se com velocidade V sob a acção de uma força F . Estando a outra placa estacionária e considerando que as partículas próximas das placas têm as velocidades das respectivas placas, o diagrama de velocidade é o representado na fig. 12.

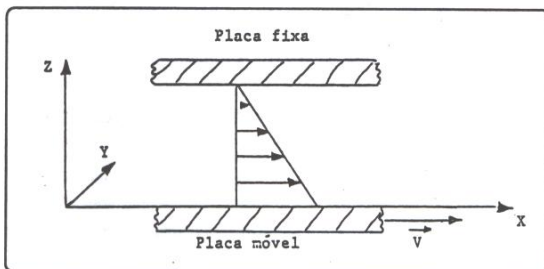


fig. 12 - Diagrama de velocidades

Note-se que até agora se tem verificado em gradiente de pressão nulo ($\frac{dP}{dX} = 0$) que não caracteriza a lubrificação hidrodinâmica. Esta fundamenta-se precisamente na criação duma zona de grandes pressões, através do movimento relativo das superfícies, que garanta a separação das mesmas.

A fig. 13 ilustra a evolução do diagrama de velocidade e do valor da pressão ao longo das superfícies a lubrificar, num esquema simplificado mas comum a todos os casos de lubrificação hidrodinâmica.

Considere-se então uma placa ligeiramente inclinada, imóvel, e uma placa não paralela à primeira com a direcção do eixo dos XX e movendo-se com velocidade V. Admita-se que o espaço entre as duas placas é preenchido por óleo, como é representado na fig. 13.

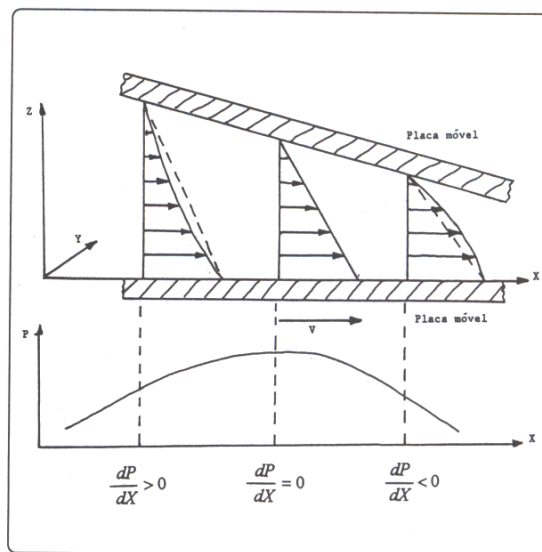


fig. 13 - Evolução da velocidade e da pressão na lubrificação hidrodinâmica

Devido à inclinação da placa fixa, o fluido vai exercer uma determinada pressão sobre a mesma, e vice-versa. Este facto significa a existência dum constrangimento ao escoamento que se traduz num gradiente de pressão adverso $(\frac{dp}{dx})_0$ originário dum perfil do diagrama de velocidades ligeiramente encurvado para dentro. Todavia, como a pressão à saída é igual à pressão atmosférica, esta tem que atingir um máximo após o qual o gradiente de pressão é favorável $(\frac{dp}{dx})_0$, e o perfil de velocidade é ligeiramente encurvado para fora. Refira-se que a evolução da pressão apresentada na fig. 13 tem sido alvo de diversos estudos no sentido de se encontrar um suporte matemático que permita, com algum rigor, descrever a sua evolução.

Neste contexto, destaca-se a equação de Reynolds, de extrema importância na teoria hidrodinâmica:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 6V\eta \frac{dh}{dx}$$

Equação de Reynolds

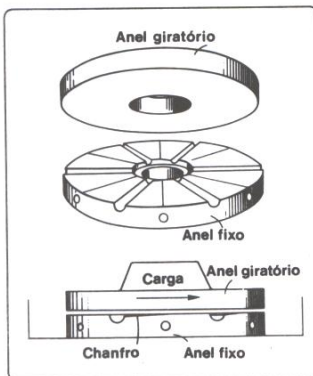


fig 14a - Chumaceira de impacto de almofadas inclinadas

As figs. 14a e 14b ilustram um processo de lubrificação hidrodinâmica bastante semelhante ao inicialmente estudado na fig. 13. Trata-se da formação de película espessa numa chumaceira de impulso de almofadas inclinadas.

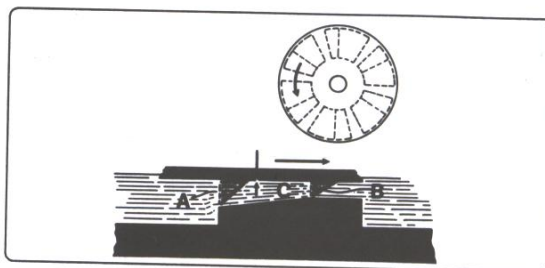


fig. 14b - Lubrificação Hidrodinâmica numa chumaceira de impulso de almofadas inclinadas.

2.2.2.2 - Lubrificação por Esmagamento de Película

A fig. 15 ilustra o princípio da lubrificação por esmagamento de película. Nesta, a carga empurra a placa A na direcção da placa fixa B, esmagando a película de óleo existente entre elas. O óleo é então afastado do ponto de carga com maior ou menor rapidez, em função da sua menor ou maior viscosidade. De facto, quanto a viscosidade é suficiente, o fluido vai demorar algum tempo até sair da zona de carga, ficando sempre algum a separar as superfícies durante a aplicação da carga. Interessa pois que o tempo de aplicação da carga não exceda o necessário para que o fluido saia da zona de carga.

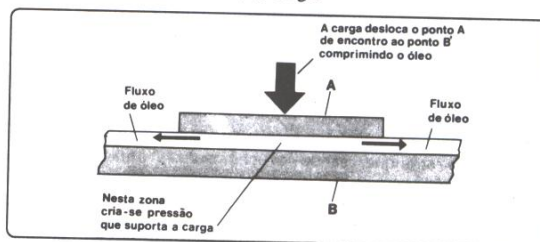


fig. 15 - Lubrificação por Esmagamento de Película

Este tipo de lubrificação fica então condicionada a situações de carga com mudança de direcção e a casos em que as superfícies tenham um movimento rotativo sobre uma película de lubrificante.

A fig. 16 ilustra um exemplo concreto deste tipo de lubrificação, nomeadamente o esmagamento de película num casquilho do cavilhão dum êmbolo.

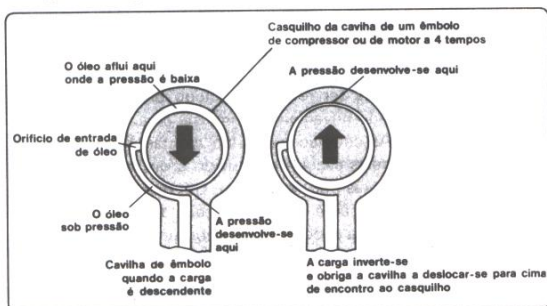


fig. 16 - Esmagamento de película num casquilho de cavilhão

2.2.2.3 - Lubrificação Hidrostática

Para melhorar as condições de arranque de algumas máquinas muito pesadas, dado que nas superfícies a lubrificar, inicialmente em contacto, pode surgir um atrito muito elevado, significando, por isso um elevado binário de arranque e um grande desgaste inicial, é injectado óleo nas chumaceiras por meio de uma bomba auxiliar de accionamento manual ou mecânico, como ilustrado na fig. 17.

O Lubrificante é introduzido no espaço existente entre as superfícies de contacto formando uma película espessa que pode reduzir o binário de arranque em cerca de 1/10. Posteriormente, a bombagem de óleo poderá ser interrompido ou não, continuando a lubrificação a efectuar-se por efeito hidrodinâmico, no primeiro caso.

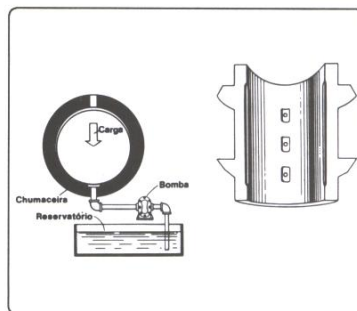


fig.17 - Lubrificação Hidrostática num caso típico duma chumaceira de casquilhos

Este tipo de lubrificação necessita de uma quantidade significativa de óleo, que permita alimentar um caudal contínuo do mesmo, a ser bombeado em todas as folgas existentes, ou mesmo, em certos casos, para refrigerar as superfícies do equipamento. Todavia, por razões que se perdem com a sua viabilidade económica, este sistema de lubrificação necessita recuperar o óleo usado através dum circuito fechado, ou seja, através de sistemas de circulação.

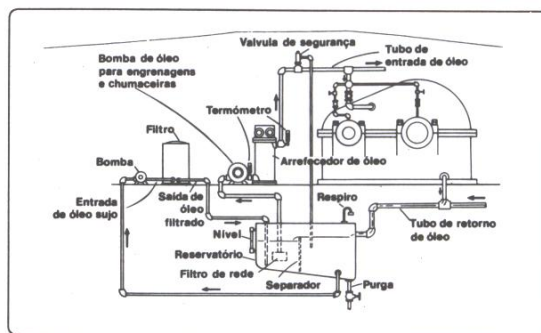


fig. 18 - Sistema de lubrificação por efeito hidrostático.

As superfícies a lubrificar ficam então em caixas fechadas, tomando possível a recuperação de óleo que delas escorre para um reservatório. Desse, e após uma sempre necessária filtragem, o óleo é novamente devolvido ao circuito.

A fig. 18 mostra um exemplo dum sistema de lubrificação por efeito hidrostático.

2.2.3 - Regime de Lubrificação por Película Fina

Por vezes, quando se alteram as condições normais de funcionamento, nomeadamente, quando se verifica um aumento de carga ou uma diminuição da velocidade relativa, acontece suceder que a película de lubrificante inicialmente espessa venha a ficar muito fina. Esta fase é normalmente característica dos tempos de arranque e paragem das máquinas.

A viscosidade do óleo é também um factor a considerar. Esta, se for insuficiente para as condições em questão, torna impossível a obtenção de uma película espessa, mesmo em condições normais de carga e velocidade.

As películas finas podem ser formadas por três mecanismos:

- 1) **Reacção Química** - um dos exemplos mais conhecidos é o dos aditivos de extrema pressão (EP), em que os compostos como cloretos e sulfuretos vão ser formados sobre as superfícies, através de reacções químicas entre os aditivos referidos acima e as superfícies a lubrificar, causadas pelas elevadas temperaturas originadas nos pontos de contacto metálico.
- 2) **Deposição Lamelar** - neste caso usam-se substâncias designadas por sólidos lamelares, como a grafite e o bissulfureto de Molibdénio (MoS_2), cuja estrutura lamelar se assemelha a um baralho de cartas. Esta estrutura permite suportar cargas

elevadas numa direcção normal às camadas, com baixo atrito interno das mesmas.

A Fig. 19 mostra um exemplo duma película à base de bissulfureto de Molibdénio.

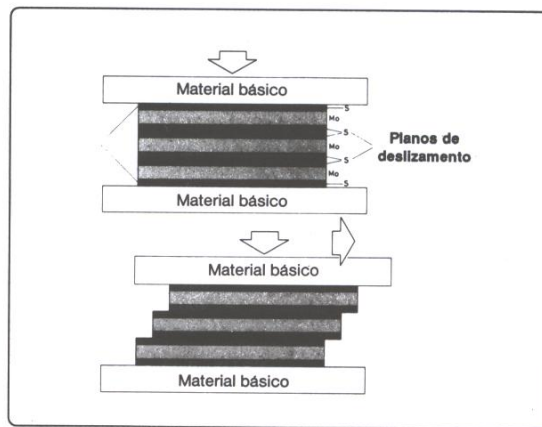


fig. 19 - Efeito dos lubrificantes sólidos com estrutura lamelar

3) **Película sólida** - este processo corresponde ao caso limite no qual é utilizado um metal extremamente dúctil como o chumbo entre as superfícies a proteger.

A lubrificação por película fina é caracterizada por uma lubrificação limite em que, devido à diminuta espessura de lubrificante existente entre as superfícies a lubrificar, a carga é suportada simultaneamente pelo contacto directo das superfícies e pela película de lubrificante.

A fig. 20 ilustra uma zona muito ampliada representativa de duas superfícies em contacto, realçando alguns dos fenómenos que acontecem na lubrificação por película fina.

A fig. 20 ilustra fundamentalmente três fenómenos distintos caracterizados por diferentes contactos entre as superfícies.

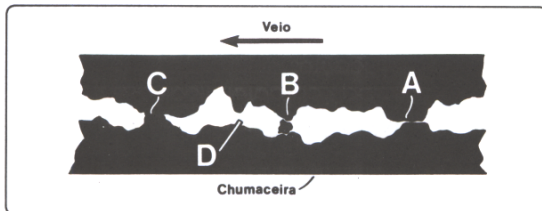


fig. 20 - Efeitos de contacto entre superfícies

- 1) Atrito de elevado grau em A, com rotura da película lubrificante e possível deformação plástica ou elástica. Refira-se que as zonas de contacto são muito pequenas, traduzindo-se em valores de pressão muito elevados;
- 2) O contacto em B é representativo da penetração da superfície mais dura na mais mole, através da formação de limalhas e por consequência de novas rugosidades;
- 3) Em alguns casos, como o representado no ponto de contacto C, verifica-se um tão intenso atrito e arranque do material que as superfícies, perfeitamente limpas e cortadas recentemente, fundem-se entre si devido à temperatura desenvolvida.

Os fenómenos descritos acontecem simultaneamente na lubrificação por película fina. Todavia, é devido ao movimento relativo e contínuo das superfícies que caracteriza a generalidade das aplicações, verificam-se outros fenómenos que interessa descrever. Nas condições de movimento

contínuo, as minúsculas soldaduras partem-se imediatamente e conforme a resistência que possuem, partem ou não pela zona de soldadura, verificando-se então uma permuta entre as superfícies, geralmente no sentido da mais mole para a mais dura. A fricção entre as superfícies, para além do desgaste que se tem vindo a analisar, provoca também temperaturas muito elevadas nos pequenos pontos onde se verifica a contacto metálico entre as mesmas. Esta situação poderá, no entanto, ser agravada quando se verificar uma alteração nas condições de funcionamento, nomeadamente, um aumento de carga associada a uma diminuição da velocidade relativa entre as superfícies que se irá traduzir num acréscimo de número de pontos de contacto, incrementando, por esta razão, a temperatura a um tal ponto que o calor não podendo já ser dissipado com a rapidez suficiente, aumenta ainda mais o grau de aquecimento dos órgãos das máquinas a lubrificar até se verificar a chamada "gripagem" do material.

2.2.4 - Teoria Elastohidrodinâmica

Pensou-se até à poucos anos que, no contacto de certos órgãos de máquinas, como dentes das engrenagens, mecanismos de "came" e nas chumaceiras de rolamentos existiam situações em que a lubrificação tinha as características duma lubrificação por película limite. Contudo, os valores de desgaste e coeficiente de atrito obtidos na prática, mais favoráveis que os característicos deste regime precário de lubrificação, levaram os investigadores a supor que o regime hidrodinâmico poderia subsistir em condições que teoricamente não o admitiam, como aliás veio a ser verificado mais tarde por via experimental. Este facto é justificado por uma deformação elástica (não permanente) das superfícies, que não havia sido considerada anteriormente, alterando a geometria confinante do fluido. O estudo simultâneo desta deformação elástica e do comportamento do lubrificante nestas condições deu origem à teoria elastohidrodinâmica.

A fig. 21 ilustra o caso em que a película de lubrificante só é possível devido à existência duma deformação elástica das superfícies, verificando-se simultaneamente importantes variações da viscosidade do fluido que garantem assim a separação das mesmas superfícies.

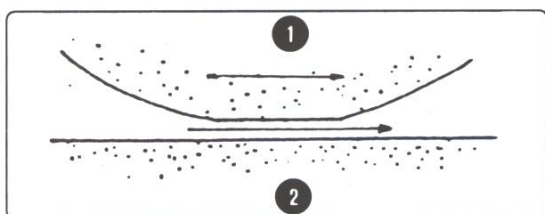


fig. 21 - Lubrificação segundo a teoria elasto-hidrodinâmica

2.3 - Lubrificantes

2.3.1 - Introdução

Já vimos que sem a lubrificação a maior parte das máquinas teria uma duração efémera, devido ao desgaste excessivo, para além dos prejuízos resultantes da inactividade da mesma e de outros custos inerentes a situações deste género. Em todo este processo que torna necessária a lubrificação, o fluido lubrificante desempenha um papel ímpar no sucesso da mesma. Este tem então como principal finalidade reduzir o contacto entre as superfícies em movimento relativo, alojando entre as mesmas uma película de cujas propriedades irá depender o sucesso da lubrificação. Destas, destacam-se: um baixo atrito interno, que reduza a um mínimo o consumo de energia; o poder antidesgaste, que se fundamenta na

capacidade em formar e manter uma película capaz de resistir a um severo arrastamento e se opor à soldadura entre superfícies ásperas; a função de refrigerar locais onde se desenvolvam temperaturas elevadas e cujo maciço de material não consiga absorver; a função de protecção contra a oxidação ou qualquer tipo de impurezas que se venham a alojar nas superfícies a lubrificar.

2.3.2 - Oleos Minerais

2.3.2.1 - Obtenção dos óleos minerais

Os óleos lubrificantes são obtidos por destilação fraccionada do petróleo bruto, na qual vão ser separados os produtos mais voláteis (gasóleo, gasolina, gás), não lubrificantes, das fracções residuais mais densas e das quais irá resultar os futuros óleos lubrificantes. Estes produtos assim obtidos e já com algumas propriedades lubrificantes, possuem ainda uma quantidade excessiva de parafinas; um grande numero de hidrocarbonetos instáveis, resinas e outros elementos indesejáveis que obrigam à necessidade de novas refinações a fim de se obter um óleo de alta qualidade.

Os óleos lubrificantes têm sido obtidos de ramas petrolíferas das mais variadas proveniências do globo terrestre. Estas ramas, como seria de esperar, vão dar origem a características físicas dos lubrificantes bastante diferentes, que, na generalidade dos casos, e levando em consideração os modernos sistemas destinados ao acabamento de lubrificantes usados pelas refinarias, estas vão ser minimizadas.

2.3.2.2. - Principais Características Físicas e Químicas

Como inicialmente foi referido, o sucesso da lubrificação dependerá não só do modo como esta é feita mas também das características do

próprio fluido lubrificante. Neste sentido, haverá interesse em conhecer com exactidão a adaptabilidade das referidas características às circunstâncias a que o lubrificante fica submetido quando solicitado em serviço. Vários ensaios laboratoriais devidamente normalizados permitem a obtenção destes valiosos elementos. Contudo, deverá chamar-se a atenção para o facto de que o comportamento do lubrificante em serviço não ficar devidamente descrito partindo unicamente de resultados obtidos pela análise das suas propriedades físicas ou químicas, obtidas nos referidos ensaios.

Seguidamente vão ser apresentadas algumas das principais características dos óleos lubrificantes a que normalmente se faz alusão aquando da sua utilização.

A) Viscosidade:

A viscosidade é provavelmente a propriedade mais importante dum óleo lubrificante. Esta não é mais que o resultado do atrito interno do lubrificante, ou seja, traduz a resistência ao deslocamento das moléculas de uma camada em relação a outra adjacente.

Considerem-se duas placas separadas por uma película de lubrificante, estando uma delas a mover-se com velocidade V , sob a acção de uma força F , e uma outra estacionária. Considere-se ainda que as partículas próximas das placas têm as velocidades das respectivas placas. Então, o diagrama de velocidade que se obtém vem igual ou ilustrado na fig. 22.

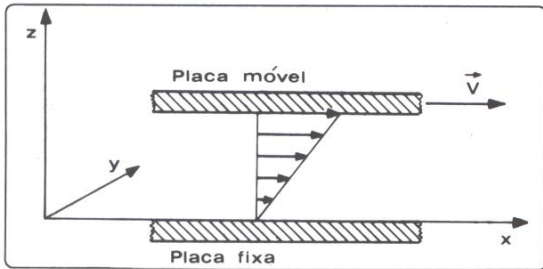


fig. 22 - Perfil de velocidades numa película de lubrificante.

Sendo A a área da placa em movimento, a força F está relacionada com o gradiente de velocidade $\frac{dv}{dz}$ representativo do declive do perfil de velocidade pela seguinte expressão:

$$F = A\eta \frac{dv}{dz} \quad \text{ou} \quad \tau = \eta \frac{dv}{dz}$$

A - área da placa móvel
 η - viscosidade dinâmica ou absoluta
 τ - tensão de corte

Nestas condições, é previsível que aplicando a mesma força, em condições dimensionalmente semelhantes, mas com fluidos de viscosidade diferentes, que o diagrama de velocidades relativos a cada fluido sejam distintos. De facto, pela equação acima depreende-se que aplicando uma certa tensão de corte ao fluido a sua viscosidade irá reflectir-se no seu diagrama de velocidades. Ou seja, quanto maior for a viscosidade, menor será o gradiente de velocidade, e vice-versa.

A Fig 23 mostra os diagramas de velocidades em situações em tudo iguais, excepto na viscosidade.

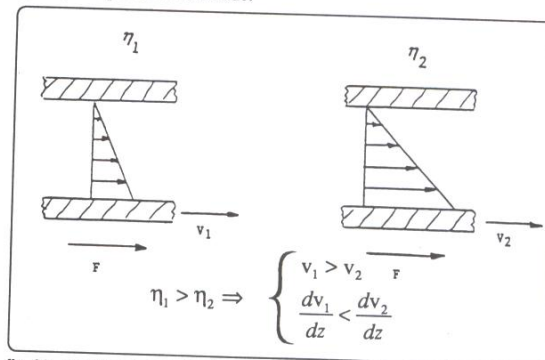


fig. 23 - Diagrama de velocidades para fluidos com viscosidades diferente

A unidade utilizada para medir a viscosidade dinâmica é o "Poise" que tem as dimensões-grama por centímetros por segundo (g/cms).

Geralmente, a viscosidade é usada na indústria petrolífera na forma da viscosidade cinemática, constituída pelo quociente entre a viscosidade dinâmica e o peso específico do fluido em questão, à mesma temperatura. A unidade em que esta se exprime é o "Stoke" cujas dimensões são centímetros quadrados por segundo (cm^2/s). Todavia, como o valor desta unidade é geralmente muito elevado nos casos mais usuais, torna-se normal indicar a viscosidade cinemática em centésimos de "stoke" ou "centistokes".

Levando em consideração que as propriedades dos fluidos lubrificantes variam, umas mais que outras, com as condições do ambiente de trabalho, significando uma alteração do seu comportamento, é importante avaliar qual a influência que a variação das condições de serviço desempenha nas referidas propriedades, nomeadamente a influencia da pressão e da temperatura.

A viscosidade tem sido alvo de diversos ensaios de modo a ser conhecido o seu valor em diferentes condições de serviço. Valores experimentais vêm demonstrar que a viscosidade diminui com o aumento da temperatura, sendo esta diminuição tanto mais significativa quanto maior for o seu valor, e aumenta com a pressão, apresentando um aumento tanto mais acentuado quanto maior for a temperatura.

A fig 24 mostra o gráfico de variação da viscosidade dinâmica com a pressão, para diversos valores de temperatura.

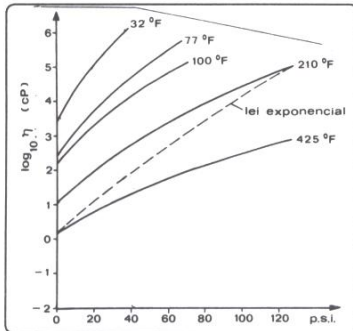


fig. 24 - Variação da viscosidade dinâmica com a pressão e temperatura

Para classificar os diversos tipos de óleos em função da variação da sua viscosidade com a temperatura, foi criado um método empírico que permite atribuir um índice de viscosidade (i) a cada lubrificante. Ficou então definido que a um elevado índice de viscosidade está associada uma menor influência da temperatura, segundo a seguinte gama de valores:

- ⇒ baixo índice de viscosidade ($i < 50$)
- ⇒ médio índice de viscosidade ($50 < i < 100$)
- ⇒ alto índice de viscosidade ($i > 100$)

O quadro da tab. 3 mostra a equivalência aproximada entre diferentes unidades de medida da viscosidade, da classificação SAE (Society of Automotive Engineers), usada oficialmente para classificar óleos para motores.

Grau SAE	Centipoises		Centistokes		S.U.S.		edwood N.º 1		Graus Engler	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Viscosidade a 0º F (-17,8ºC)										
5 W	-	1200	-	1300	-	6000	-	5200	-	172
10 W	1200	2400	1300	2600	6000	12000	5200	10500	172	343
20 W	2400	9600	10500	12000	48000	10500	42500	343	1386	
Viscosidade a 210º F (99ºC)										
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
20	4,7	7,9	5,7	9,6	45	58	41	52	1,45	1,80
30	7,9	10,6	9,6	12,9	58	70	52	62	1,80	2,12
40	10,6	13,8	12,9	16,8	70	85	62	75	2,12	2,52
50	13,8	18,7	16,8	22,7	85	110	75	98	2,52	3,19
-	3,2		3,9		39		36		1,31	
-	3,5		4,2		40		37		1,34	

tab. 3 - Tabela de conversão para diferentes unidades de medida da viscosidade

B) Ponto de inflamação e de combustão

O controlo desta propriedade destina-se fundamentalmente a garantir condições de segurança quando os óleos são usados em ambientes de trabalho que envolvem temperaturas elevadas.

Por definição, podem ser considerados duas situações distintas, dependendo do facto da combustão ser sustentada ou não. Neste sentido, definem-se dois pontos de temperatura que as caracterizam:

Ponto de inflamação - é a temperatura mínima para a qual o óleo liberta vapores suficientes a provocarem a sua ignição, após se lhe aproximar uma chama, sem que a combustão se mantenha.

Ponto de combustão - é a temperatura mínima para a qual a libertação de vapores de óleo é suficiente para alimentar uma combustão contínua durante pelo menos 5 segundos.

C) Ponto de Escorrimento ou de Congelação

Esta propriedade não é mais do que a temperatura para a qual se deixa de verificar o escoamento do óleo. Para o consumidor, o ponto de escorrimento ou de congelação do lubrificante só terá interesse quando este possa vir a afectar o desempenho do lubrificante nas condições de serviço a que irá ficar submetido.

D) Estabilidade à oxidação

De um modo geral, grande parte dos óleos lubrificantes são usados em ambientes onde existem temperaturas elevadas, como acontece nos motores de combustão interna, e, quando em contacto com o ar - a maioria das situações -, ficam sujeitos a fenómenos de oxidação, caracterizados pela combinação das moléculas dos hidrocarbonetos com o oxigénio do ar, causadores duma profunda alteração das características dos lubrificantes, como o escurecimento da cor; o aumento de viscosidade e, em condições extremas, o engrossamento do óleo através da formação

de depósitos de borra castanha insolúvel. Refira-se que quando as temperaturas ascendem a valores da ordem dos 150 a 200°C o processo sofre um agravamento.

Existe, portanto, todo o interesse em analisar o comportamento dos diferentes lubrificantes no que respeita à maior ou menor facilidade com que se oxidam. Por esta razão, são realizados alguns testes devidamente normalizados que, acelerando o processo de oxidação, permitem conhecer o comportamento dos diferentes óleos nas condições referidas.

2.3.2.3 - Aditivos

A adição de agentes químicos nos óleos lubrificantes, vulgarmente conhecidos por aditivos, tem como finalidade conferir-lhes determinadas características, depois de acabados, dando-lhes novas propriedades úteis que não existiam originalmente ou então melhorando as já existentes.

Os aditivos estão presentes, em maior ou menor quantidade, em praticamente todos os tipos de lubrificantes e têm contribuído de forma decisiva para o progresso dos motores e de toda a maquinaria em geral.

Os aditivos podem ser divididos em dois grupos:

- 1 - os que modificam algumas características físicas, como a temperatura de escoamento, a formação de espuma, o índice de viscosidade, etc..
- 2 - Os que modificam características químicas como antioxidantes, antiferrugem, aditivos EP, aditivos antidesgaste, etc.

Seguidamente vão ser apresentados os tipos mais correntes destes produtos, em particular, aqueles que possuem uma finalidade específica.

Melhoradores do Índice de Viscosidade

A viscosidade de um óleo lubrificante ao qual foram adicionados estes aditivos, vem muito mais alterada na zona de altas temperaturas, Assim, se a um óleo lubrificante de baixa viscosidade for adicionado um

aditivo que melhora (aumente) o seu índice de viscosidade, verificar-se-á um ligeiro aumento da sua viscosidade a baixa temperatura, mantendo, portanto, as suas características de fluidez nesta gama de temperaturas, enquanto que se notará um aumento relativamente maior da sua viscosidade na zona de altas temperaturas, permitindo colher os benefícios resultantes das altas viscosidades do óleo nas condições normais de trabalho do equipamento.

Estes aditivos são usados em fluidos destinados a caixas de velocidade automáticas, nos sistemas hidráulicos e nos óleos para motores. Refira-se que nestes últimos, os óleos contendo aditivos destinados a melhorar o índice de viscosidade e que satisfazem as exigências de duas ou mais viscosidades, são designados por óleos "Multigrades". Estes conservam um ponto de fluidez óptimo a baixas temperaturas, facilitando o arranque dos motores e a rápida circulação do óleo em tempo frio, mantendo, simultaneamente, a viscosidade necessária quando solicitados a altas temperaturas.

Aditivos Anticongelantes

Destinados fundamentalmente a baixar o ponto de escorrimento ou de congelação, estes aditivos podem baixar esta temperatura em cerca de 30°C.

Aditivos Antioxidantes

A sua principal função será evitar, retardar ou modificar a reacção dos hidrocarbonetos constituintes dos óleos com o oxigénio do ar.

Aditivos Inibidores de ferrugem

Através duma interacção física ou química com as superfícies a proteger, estes aditivos formam uma película contínua que, aderindo às referidas superfícies, impede o contacto destas com o oxigénio.

Aditivos dispersantes e detergentes

Estes aditivos actuam simultaneamente como dispersantes e detergentes se movendo depósitos ao mesmo tempo que impedem que

os produtos da oxidação se aglomerem em partículas de grandes dimensões.

Aditivos Antidesgaste

Fundamentalmente desenvolvidos para reduzir ou eliminar o desgaste por atrito em condições de lubrificação extrema, associada a elevadas velocidades de escorregamento e grandes cargas, estes aditivos podem ser classificados em três tipos:

- 1 - agentes de untuosidade;
- 2 - agentes para condições de serviço médio (mild - EP);
- 3 - agentes para condições de serviço severos, ditas de extrema pressão (EP) - estes aditivos, auxiliados pela temperatura resultante do atrito entre as superfícies, vão reagir e formar películas lubrificantes que impedem o contacto das superfícies e por consequência a gripagem das mesmas.

A tab. 4 mostra um quadro com as áreas de especial interesse dos vários aditivos

Aplicação	Aditivos
Rolamentos, Engrenagens	AO, F, AE, IC
Equipamentos Téxteis	AO, IV, F, AE, EP
Redutores e Multiplicadores	AO, IV, F, IC, EP
Turbinas	AO, IV, AE, TS, IC
Transformadores	AO, F, L
Motores	AO, IC, IV, F, AE, EP
Compressores	AO, IV, F, EP, IC, L

AO - Anti-oxidante; **IV** - Melhoradores do Índice de viscosidade; **F** - Abaixador do ponto de fluidez; **AE** - Anti-espumas; **IC** - Inibidores de corrosão; **BC** - Bactericidas; **TS** - Modificadores da tensão superficial; **L** - Outros compostos *; **EP** - Aditivos de "extrema pressão" e anti-desgaste.

* Controladores do cheiro, melhoradores de untuosidade, adesividade, etc.

tab. 4 - Aplicações dos Aditivos

2.3.3 - Massas Lubrificantes

2.3.3.1 - Obtenção das Massas Lubrificantes

A American Society for Testing Materials, no seu ASTM designation D 288, define massa lubrificante como sendo: "O produto da dispersão dum agente espessante num lubrificante líquido, com uma consistência entre sólida e semi-fluida, podendo conter outros ingredientes destinados a conferir-lhe propriedades especiais". Estas massas, salvo casos excepcionais altamente especializados, são constituídas por um elemento líquido à base de óleo mineral e são empregues em aplicações cujas solicitações de serviço são geralmente desfavoráveis a um lubrificante líquido. Estas solicitações caracterizam-se principalmente por um difícil acesso do lubrificante à zona das superfícies a lubrificar; uma vedação deficiente, que implica perdas de lubrificante e, simultaneamente, a sua contaminação; uma eficaz protecção contra a ferrugem e corrosão das superfícies.

As massas lubrificantes podem ser divididas em quatro tipos diferentes consoante se utilize um espessante (sabões) de características distintas. Assim, estas são agrupadas do seguinte modo:

- ⇔ Massas Cálcicas
- ⇔ Massas Sódicas
- ⇔ Massas Líticas (multipurpose)
- ⇔ Massas Complexas (combinação de dois ou mais sabões metálicos)

Estas massas apresentam características diferentes obrigando a aplicações das mesmas também distintas, em função das solicitações de serviço de cada caso.

A tab. 5 apresenta um quadro com algumas das suas principais aplicações.

Massas com óleos minerais				
Sabão	Temp. mín. e máx. de utilização (°C)	Protecção de contra-ferrugem	Utilização	Custo
Cálcio	-20 / 60	-	Geral	Baixo
Sódio	0 / 150	Sim	Vedant., rolam. c/ veloc. reduz. e médias	Baixo
Cálcio/Sódio (complexas)	-40 / 130	Sim	Rolam. c/ veloc. elev.	Médio
Lítio	-40 / 150	Sim	Todos os tipos de rolamentos	Médio

tab. 5 - Aplicações das Massas Lubrificantes

2.3.3.2 - Principais características das massas lubrificantes

À semelhança do que anteriormente foi referido na lubrificação por meio dum elemento líquido, também neste caso em que se usam lubrificantes semi-sólidos (massas), as características das mesmas face às exigências criadas durante as solicitações de serviço implicarão o sucesso ou fracasso da lubrificação. Torna-se então indispensável determinar as propriedades das referidas massas, de modo a possibilitar o conhecimento prévio do seu comportamento nas mais variadas aplicações e, por consequência, uma correcta escolha das mesmas, face à aplicação a que se destinam.

A) Consistência

A consistência define a fluidez duma determinada massa quando submetida à pressão. Inicialmente, para representar esta característica, empregavam-se os termos "mole", "espesso", "médio", etc. ficando um pouco indefinido o seu carácter universal. Em 1941 foi então criado um sistema de medida e uma classificação adequada para definir esta

propriedade. Veja-se, por exemplo, a tab. 6 constituída por um quadro de classificação NLGI da consistência das massas lubrificantes.

Grau de consistência	Penetração trabalhada ASTM* a 77 ° F (25°C)
000	445 a 475
00	400 a 430
0	355 a 385
1	310 a 340
2	265 a 295
3	220 a 250
4	175 a 205
5	130 a 160
6	85 a 115

* A penetração é a profundidade, medida em décimos de milímetro, que um cone de dimensões e peso normalizados e deixado cair de uma dada altura, penetra na massa. A medição é feita ao fim de 5 segundos. A penetração diz-se trabalhada quando a amostra a submeter a ensaio é agitada, segundo regras específicas, antes da medição.

tab. 6 - Classificação NLGI da consistência das massas lubrificantes.

O grau de consistência é unicamente vantajoso na previsão do que pode valer uma massa como vedante ou retentor. Isto significa que, de duas massa com a mesma composição e consistência diferentes, a que apresentar maior consistência terá melhores propriedades como vedante. Refira-se, todavia, que no que diz respeito ao comportamento duma massa em serviço, a consistência tem pouco significado já que massas com consistência distintas podem apresentar comportamentos idênticos e vice-versa.

B) Viscosidade Aparente

Nos óleos lubrificantes, em que é válida a lei de Newton, a viscosidade é independente do valor da tensão de corte, enquanto que nas massas lubrificantes a viscosidade diminui com o aumento desta mesma tensão. Nestas últimas é utilizado o conceito da viscosidade aparente, definida pela equação de Poiseilles. Esta, é constituída pela razão entre a tensão de corte pela sua variação.

Refira-se que os valores da viscosidade aparente são particularmente úteis na previsão do comportamento das massa nas múltiplas aplicações em sistemas mecânicos.

C) Estabilidade Mecânica ou Estrutural

Geralmente, a estabilidade mecânica das massas é de uma importância capital para o sucesso da lubrificação. Se, por efeito de severos esforços constantes, a massa perde essa estabilidade ao mesmo tempo que se verifica uma alteração na sua consistência, irão surgir inúmeras dificuldades que se traduzirão numa lubrificação deficiente e, por consequência, em todos os prejuízos daí resultantes.

D) Resistência à Oxidação

Para além da referida estabilidade mecânica, também a estabilidade química das massas (resistência à oxidação) é uma característica importante, principalmente quando a massa funciona a elevadas temperaturas, uma vez que nestas condições as reacções de oxidação são mais intensas.

E) Propriedades de Resistência à água

Particularmente importante nas chumaceiras sujeitas a ambientes muito húmidos, esta propriedade caracteriza simultaneamente a resistência à lavagem da massa pela água e a imutabilidade da sua estrutura quando misturada com a água. Refira-se que esta propriedade poderá sofrer grandes alterações dependendo da concepção da caixa de rolamentos e das empanques usados.

2.3.4 - Outros lubrificantes

Reservados a aplicações muito particulares, os lubrificantes não minerais mais conhecidos e mais comuns são os lubrificantes sintéticos e os lubrificantes sólidos.

Lubrificantes Sintéticos:

Estes lubrificantes são usados quando os de origem mineral não satisfazem os requisitos necessários às solicitações de serviço. A grande vantagem destes relativamente aos de base mineral reside no seu maior índice de viscosidade a temperaturas elevadas e num ponto de fluidez inferior em cerca de 30°C. Contrariamente, a sua grande desvantagem diz respeito ao seu elevado custo actual que se irá reflectir numa aplicação menos generalizada do mesmo.

As aplicações mais correntes deste lubrificante, para além da indústria aeronáutica, destina-se a compressores frigoríficos, turbinas de gás, sistemas hidráulicos e engrenagens, sendo esta última a aplicação cujas vantagens são mais evidentes porque têm possibilitado um aumento considerável das cargas a transmitir, para uma maior vida útil do equipamento.

Lubrificantes sólidos:

São particularmente usados em condições de cargas extremamente elevadas, ambientes muito corrosivos ou poeirentos, temperaturas muito elevadas ou muito baixas, etc.

Os elementos sólidos caracterizam-se por possuírem uma estrutura lamelar e uma baixa resistência ao deslizamento das mesmas, sendo essencialmente constituídos por sulfureto de molibdénio ($S_2 Mo$) ou grafite.

2.3.5 - Aplicações dos lubrificantes

É difícil definir fronteiras para a aplicação dos diversos tipos de lubrificantes. No entanto, é possível indicar determinadas áreas de aplicação, indicadas na tab. 7, bem como os principais requerimentos dos principais órgãos de máquinas a lubrificar, na tab. 8.

Tipo de lubrificante	Lubrificação Limite	Arrefecimento	Retenção pela Chumaceira	Sensibilidade à Temperatura	Protecção contra a corrosão	Protecção contra contaminantes
Óleo Mineral Puro	X	XX	X a)	XX	XX	X
Óleo Mineral com Aditivos	* / **	XX	XX a)	*	**	X
Óleo Sintético	X / **	XX	XX	X / **	X / XXX	X
Massas Lubrificantes	* / **	X	XX / XXX	X / *	**	*

Chave: X - Mau XX - Razoável XXX - Bom * - Muito bom ** - Ótimo
a) - Dependendo da viscosidade

tab. 7 - Áreas de aplicação das diversos lubrificantes

Tipo de Elemento a Lubrificar	Características					
	Lubrificação Limite	Arrefecimento	Atrito / Binário	Retenção pela Chumaceira	Protecção contra contaminantes	Temperatura
Chumaceira de Casquilhos	I	MI	I	I	SI	I
Rolamentos	MI	MI	MI	MI	MI	MI
Engrenagens (Fechadas)	FU	FU	MI	SI	SI	MI
Engrenagens (Abertas) Cadeias, etc.	MI	SI	SI	I	I	I
Aparelhos de Precisão	MI	SI	MI	FU	SI	SI
Dobradiças, Linguetas, etc.	I	SI	I	I	I	I

Chave: SI - Sem importância I - Importante MI - Muito importante FU - Fundamental

tab. 8 - Principais requerimentos de alguns órgãos de máquinas, para uma boa aplicação tribológica.

Referências

- 1 - "FARM WORKSHOP AND MAINTENANCE"; Granada Publishing.
- 2 - H.V.M. STEWART; "As Técnicas da Conservação Eficiente".
- 3 - IDHAMMAR KONSULT; "Reability And Maintenance I".
- 4 - F.A. PINA DA SILVA; "Tribologia, I vol. Noções Gerais"; Fundação Calouste Gulbenkian; 1985.
- 5 - C.A.G. MOURA BRANCO; "Controlo de Ruína em Equipamentos Mecânicos Inspeção"; ITEC, Courses on Condition Monitoring of Equipment; Lisboa; 1992.
- 6 - "Fundamentos da Lubrificação"; Coleção Técnica; Mobil; 1980.
- 7 - JORGE SARAIVA; "Mecânica dos Fluidos I"; IST.
- 8 - "Lubrificación de rodamientos"; FAG, Publicação nº 81115 SA de 1986.
- 9 - "Lubrificação e Manutenção Preventiva de Motores Diesel"; Coleção Técnica; Mobil; 1980.