

MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
PROPULSÃO NAVAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

USO DA FERROGRAFIA PARA VERIFICAÇÃO DO DESGASTE DE UM MCP

1º TEN BRUNO NOGUEIRA DIÓGENES SALDANHA

Rio de Janeiro
2020

1º TEN BRUNO NOGUEIRA DIÓGENES SALDANHA

USO DA FERROGRAFIA PARA VERIFICAÇÃO DO DESGASTE DE UM MCP

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Orientadores:

Prof. Dr. Luiz Augusto Rocha Baptista

1º ten (EN) Gilber Lunz Debona

CIAW
Rio de Janeiro
2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

1º TEN BRUNO NOGUEIRA DIÓGENES SALDANHA

USO DA FERROGRAFIA PARA VERIFICAÇÃO DO DESGASTE DE UM MCP

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Aprovada em _____

Banca Examinadora:

Luiz Augusto Rocha Baptista, Dr. – UFRJ _____

Gilber Lunz Debona, EN – AgNSNQ _____

Carlos Alfredo Órfão Martins, Me. – UFRJ _____

Dedico esse trabalho à minha família, em especial à minha mãe, Ana Lúcia e à minha esposa, Dayanne, que além de apoio moral, me ajudou com a correção gramatical deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a confecção deste trabalho. Entre outros, estão minha mãe, minha esposa, meus orientadores técnico e acadêmico e ao comandante Carlos Martins.

USO DA FERROGRAFIA PARA VERIFICAÇÃO DO DESGASTE DE UM MCP

Resumo

Os óleos lubrificantes, utilizados em motores de combustão interna de navios, desempenham diversas funções, como a de lubrificação, resfriamento de peças e de vedação de folgas. Esses óleos podem ser utilizados, por meio da análise ferrográfica, para monitorar e diagnosticar avarias ou redução de eficiência nesses motores. Essas análises são feitas por meio do estudo de ferrogramas, que são, basicamente, lâminas de vidro em que são depositadas as partículas de desgaste presentes no óleo. Essas análises, além de indicarem o estado de degradação do óleo, fornecem informações acerca do nível de desgaste dos componentes de um motor. Assim sendo, a presença de grande quantidade de partículas ferrosas nessas análises, por exemplo, pode ser um indicativo de desgaste acima do normal de uma peça em particular. Além disso, essas análises podem fornecer informações sobre o tipo de desgaste que determinada peça sofreu, bem como o grau de severidade desse desgaste. Os dados coletados, em vários ferrogramas, podem ser monitorados de tal forma que se consiga elaborar uma manutenção preditiva daquela máquina. Para isso, o comportamento de um parâmetro, que pode ser a concentração de partículas, é observado ao longo de determinado período, construindo-se, dessa forma, um gráfico do parâmetro em função do tempo. Com isso, consegue-se identificar o momento em que ocorre uma falha potencial, instante em que a inclinação da curva começa a aumentar, tornando-se ascendente, e, por extrapolação desse comportamento, predizer o instante da falha catastrófica.

Palavras-chave: Ferrografia; Lubrificante; Diagnóstico de máquinas; Manutenção preditiva.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Visão Geral do Sistema de Lubrificação de um Motor Diesel Marítimo.....	16
Figura 2.2 - Classificação das partículas de desgaste.....	18
Figura 2.3 - Incidência de partículas de desgaste.....	18
Figura 2.4 - Gráfico de tendências.....	19
Figura 2.5 - Curva de asa.....	20
Figura 2.6 - Ilustração de um ferrógrafo analítico.....	20
Figura 2.7 - Ilustração da forma de deposição das partículas de desgaste em um ferrograma.....	21
Figura 2.8 - Ilustração de um ferrograma.....	21
Figura 2.9: Elementos de um Tribossistema: anéis de segmento, cilindro, lubrificante e meio	22
Figura 2.10: Ilustração do Contato entre Superfícies.....	23
Figura 2.11: Esquema das Camadas de uma Superfície.....	24
Figura 2.12 - Partículas geradas por desgaste normal de uma máquina.....	26
Figura 2.13 - Partículas geradas durante o amaciamento de uma máquina.....	27
Figura 2.14 - Desgaste por abrasão a dois corpos.....	28
Figura 2.15 - Desgaste abrasivo a três corpos.....	30
Figura 2.16 - Partículas esféricas.....	32
Figura 2.17 - Partículas de fadiga em forma de lascas.....	33
Figura 2.18 - Partícula laminar.....	34
Figura 2.19 - Partículas de desgaste severo por deslizamento.....	36
Figura 2.20 - Partículas de alumínio.....	37
Figura 2.21 - Partícula de liga de cobre.....	38
Figura 2.22 - Partícula de Pb/Sn.....	39
Figura 2.23 - Partículas de óxido vermelho. A esquerda, em luz bicromática; no meio, em luz branca refletida e luz verde transmitida; e a direita em luz branca transmitida.....	41
Figura 2.24 - Partículas de óxido escuro. À esquerda, em temperatura ambiente; e, à direita, com ferrograma aquecido a 330°C.....	42
Figura 2.25 - partículas ferrosas de uma óxido, imagens superiores; Partículas de sílica, imagens inferiores.....	42
Figura 2.26 - À esquerda, fibra de celulose; ao centro, fibras de vidro; à direita, fibra de poliéster.....	44

Figura 2.27 - Variação da concentração de partículas ao longo do tempo.....	45
Figura 2.28 - Diagrama esquemático mostrando a diferença, para duas concentrações diferentes, nas inclinações entre a concentração real para $b = 3\%$ e a curva teórica (---).....	49
Figura 2.29 - Erro na concentração em função do procedimento de cálculo devido à concentração b . A imagem, à esquerda, relaciona o volume de óleo com o erro para várias concentrações normalizadas e a imagem, à direita, relaciona a concentração com o erro para vários valores de b	50
Figura 2.30 – Curva da "banheira" (imagem à esquerda); Curva de falha potencial (imagem à direita).....	52
Figura 4.1 - Porcentagem de área coberta no ferrograma por distância no ferrograma para partículas de ferro fundido e partículas de aço, em amostragens realizadas com 3 horas de diferença.	54
Figura 4.2 - Porcentagem de área coberta em função do tempo de funcionamento do motor para partículas de aço e partículas de ferro fundido.	55
Figura 4.3 - Porcentagem de área coberta em função do tempo de utilização para os motores de bombordo e boreste.....	56
Figura 4.4 - Imagens de ferrogramas das amostras de óleo lubrificante dos motores 1 (a), 2 (b) e 3 (c).	57
Figura 4.5 - Imagens de ferrogramas das amostras de óleo lubrificante dos motores 4 (a), 5 (b) e 6 (c).	58

LISTA DE TABELA

Tabela 2.1 - Formas de se identificar algumas partículas.....	43
---	----

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Apresentação do Problema	12
1.2 Justificativa e Relevância.....	12
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo Geral.....	12
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
1.4 Organização da Monografia.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Métodos de Manutenção Preditiva.....	14
2.2 Sistema de Lubrificação de um Motor Diesel.....	15
2.2.1 Visão Geral do Sistema de Lubrificação	15
2.2.2 Funções do Sistema de Lubrificação	16
2.3 Ferrografia.....	17
2.3.1 A técnica da Ferrografia.....	17
2.3.2 O Ferrógrafo Analítico.....	20
2.4 Tribologia.....	22
2.4.1 Contato entre Superfícies	22
2.4.2 Desgaste (BRUNETTI - 2012)	23
2.5 Partículas Presentes na Amostra	24
2.5.1 Partículas Ferrosas Geradas por Desgaste	24
2.5.2 Partículas Metálicas não Ferrosas Geradas Por Desgaste	36
2.5.3 Óxidos de Ferro.....	39
2.5.4 Partículas Misturadas	42
2.5.5 Contaminantes Originados dos Filtros de Óleo Lubrificante	43
2.6 Amostragem.....	44
2.6.1 Técnicas de Amostragem.....	45
2.6.2 Amostragem pela Tubulação	46

2.6.3	Amostragem pelo Reservatório de Óleo	47
2.6.4	Frequência de Amostragem	47
2.6.5	Concentração de Partículas na Amostra	48
2.7	Manutenção Preditiva por Ferrografia	50
3.	METODOLOGIA	52
4.	DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
4.1	Análises de Casos Reais.....	53
4.1.1	Análise por Ferrografia Quantitativa de Motores Diesel.....	53
4.1.2	Análise, por Ferrografia Analítica, de seis Motores Diesel	56
4.2	Considerações sobre a Utilização da Ferrografia na Marinha do Brasil.....	58
5.	CONCLUSÃO	60
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	61
	REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

As técnicas de manutenção corretiva e preventiva ainda são bastante utilizadas nas indústrias e nos meios navais. Essas técnicas, apesar de cumprirem um dos objetivos da manutenção, o qual consiste em garantir o funcionamento da máquina, apresentam alguns problemas, como a perda de eficiência devido às paradas inoportunas, no caso da corretiva, e o gasto excessivo com troca de componentes, no caso da preventiva. Nessa esfera, a técnica da manutenção preditiva foi criada com o intuito de reduzir as paradas inoportunas e o gasto excessivo com substituição de componentes. Para pôr em prática essa técnica, é necessário acompanhar parâmetros indicativos do estado do equipamento, detectando as falhas e componentes envolvidos, conseguindo, dessa forma, usá-los para fazer um diagnóstico do equipamento. Assim, a falha pode ser identificada em seu início, sendo possível planejar a parada para manutenção corretiva, bem como, quando o diagnóstico é de normalidade, os períodos de manutenção preventiva podem ser expandidos, evitando trocas desnecessárias.

Dentre os inúmeros parâmetros que podem ser monitorados nos equipamentos, ressalta-se, aqui, a análise de óleo lubrificante, mais especificamente a Ferrografia.

A técnica da ferrografia consiste, basicamente, na análise qualitativa e quantitativa das partículas de desgaste presentes no óleo lubrificante, possibilitando, dessa forma, obter informações sobre o tipo e severidade do desgaste, assim como identificar em qual componente esse desgaste está ocorrendo.

A ferrografia também pode ser utilizada como uma ferramenta para a elaboração de uma manutenção preditiva. Para isso, é necessário monitorar, por meio da realização de várias amostragens do óleo lubrificante, alguns parâmetros, como concentrações e dimensões das partículas de desgaste. Os dados coletados são utilizados para fazer uma análise gráfica de tendência dos parâmetros. Dessa forma, consegue-se identificar o instante de ocorrência da falha potencial, quando a curva começa a sofrer uma inclinação ascendente, e, prolongando-se esta inclinação, é possível prever o instante em que ocorrerá uma falha funcional.

Neste trabalho, serão apresentadas as técnicas de ferrografia, bem como serão feitas algumas considerações sobre análises ferrográficas de casos reais aplicadas à motores diesel, presentes em alguns artigos.

Por fim, será feito um breve comentário em torno da utilização desta técnica como um instrumento para implantação de um sistema de manutenção preditiva em alguns navios da Marinha do Brasil, considerados essenciais, como o Porta-Helicópteros Multipropósito Atlântico, as fragatas participantes na missão Líbano e o Navio Escola Brasil.

1.1 Apresentação do Problema

O problema central deste trabalho consiste em mostrar como utilizar uma técnica para monitorar e diagnosticar problemas em um motor de combustão principal sem a necessidade de desmontá-lo para isso.

1.2 Justificativa e Relevância

Conforme explicado na introdução, a ferrografia é uma das técnicas de análise de óleo lubrificante utilizada na manutenção preditiva, e que possibilita diagnosticar condições de desgaste do motor, sem a necessidade de desmontá-lo, economizando, dessa forma, diversos recursos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é apresentar a Técnica da Ferrografia e sua aplicação ao diagnóstico de motores diesel.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são: realizar um estudo de um caso real de uma análise ferrográfica de óleo aplicada a MCPs e tecer alguns comentários acerca da utilização da ferrografia na Marinha do Brasil.

1.4 Organização da Monografia

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O capítulo 1 consiste na introdução. No capítulo 2, que é o referencial teórico, são abordadas algumas noções sobre manutenção preditiva, sistema de lubrificação forçada de um motor diesel, tipos de desgaste e suas respectivas partículas, amostragem, Ferrografia Analítica e Ferrografia Quantitativa. No capítulo 3, está explicitada a metodologia utilizada para estruturação deste estudo. No capítulo 4, faz-se uma breve análise de artigos que tratam de ferrografia e, também, realizam-se algumas considerações em torno do uso da ferrografia na Marinha do Brasil. Por fim, aborda-se, no capítulo 5, a conclusão.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Métodos de Manutenção Preditiva

Existem, basicamente, três técnicas de manutenções: a corretiva, a preventiva e a preditiva. A primeira é utilizada quando um determinado defeito já ocorreu, fazendo-se, assim, a troca ou restauração da peça defeituosa. A segunda consiste na troca ou manutenção das peças ou sistemas, seguindo um cronograma pré-estabelecido, baseado no manual do fabricante, sem, contudo, analisar o estado das peças.

Já a manutenção preditiva, como o próprio nome diz, tem intuito de predizer falhas através do diagnóstico periódico do equipamento, por intermédio da coleta de informações do equipamento, tais como: pressões, temperaturas, parâmetros elétricos, vibrações, etc, bem como informações contidas no lubrificante, caso este seja utilizado no equipamento. Esta coleta deve ser realizada em determinados intervalos de tempo, para que a tendência do comportamento do parâmetro seja verificada ao longo do tempo. Qualquer alteração, na tendência individual, é um indício de surgimento de uma falha. A identificação desta falha é feita por meio do conhecimento da relação entre parâmetros e falhas, sendo, portanto, necessária a análise dos dados coletados.

Existem diversas técnicas de manutenção preditiva. Dentre elas, pode-se citar:

- Monitoração periódica por análise de parâmetros operacionais;
- Análise físico-química periódica de óleo lubrificante;
- Análise do estado das superfícies;
- Análise de vibrações;
- Raio x;
- Ultrassom;
- Termografia; e
- Ferrografia.

2.2 Sistema de Lubrificação de um Motor Diesel

2.2.1 Visão Geral do Sistema de Lubrificação

O sistema de lubrificação dos motores do sistema de propulsão de navios é do tipo lubrificação forçada. Nesse tipo de lubrificação, uma bomba de deslocamento positivo envia o óleo a uma determinada vazão e pressão para todas as peças móveis do motor. De acordo com BRUNETTI (2012), os principais componentes lubrificados por esse sistema são:

- Mancais principais;
- Bielas;
- Topo dos pistões;
- Eixo do comando de válvulas;
- Eixo de balanceiros;
- Acessórios do motor; e
- Engrenagens de sincronização.

A Figura 2.1 mostra um esquema das principais peças lubrificadas em um MCP. Além disso, ela ressalta alguns componentes importantes do Sistema de Lubrificação, como o resfriador de óleo, o qual é, geralmente, constituído de um trocador de calor casco-tubos com fluido refrigerante sendo água, a bomba de óleo lubrificante, que é do tipo deslocamento positivo e acionada pelo eixo de manivelas, e os filtros de óleo lubrificante.

SISTEMA GERAL DE ÓLEO

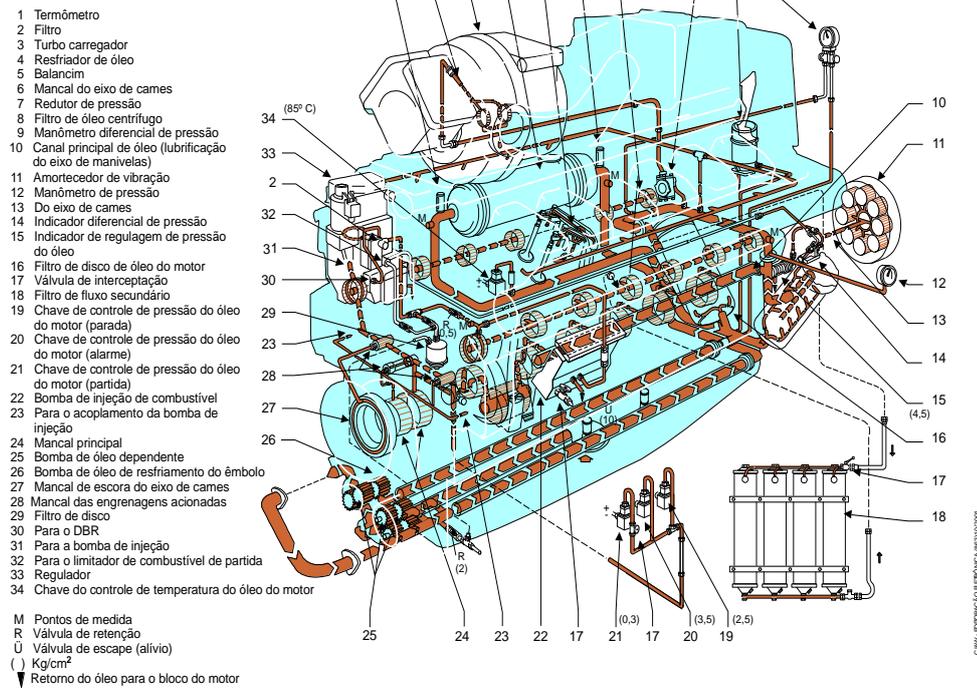


Figura 2.1 - Visão Geral do Sistema de Lubrificação de um Motor Diesel Marítimo. (BRUNETTI, 2012).

2.2.2 Funções do Sistema de Lubrificação

De acordo com BRUNETTI (2012), as principais funções do sistema de lubrificação são:

- Diminuir o atrito entre as peças que apresentam movimento relativo entre si (pistões, cilindros, anéis e mancais) e impedir o contato direto entre elas, por meio da formação de uma película de óleo lubrificante, o que resultaria em desgaste excessivo;
- Limpeza das superfícies e remoção das partículas metálicas oriundas do desgaste;
- Resfriamento das peças lubrificadas (o próprio óleo é resfriado em trocadores de calor casco-tubos com fluido de resfriamento sendo a água salgada);
- Auxiliar na vedação entre pistões, cilindros e anéis;
- Proteger contra a corrosão;
- Facilitar a eliminação de produtos indesejáveis; e
- Evitar a formação de espuma.

Para que o sistema de lubrificação funcione da forma adequada, é necessária a quantidade certa de lubrificante, com as propriedades adequadas. Além disso, as peças precisam ter um acabamento específico e estarem com as folgas entre elas dentro dos limites. Adicionalmente, a pressão específica das superfícies de contato deve ser adequada (BRUNETTI, 2012).

A pressão e a temperatura do óleo lubrificante exercem uma grande influência na forma como é feita a lubrificação das peças. Quando esta pressão está abaixo do permitido, a parte metálica das peças tende a entrar em contato durante certos instantes, o que provocará um desgaste acima do normal das peças. Comportamento semelhante ocorre quando a temperatura do óleo fica acima do permitido, fazendo com que a viscosidade diminua, o que, também, permitirá um maior contato entre as peças, aumentando o desgaste.

2.3 Ferrografia

2.3.1 A técnica da Ferrografia

De acordo com CUNHA (2005), a ferrografia consiste em uma técnica de acompanhamento do estado de desgaste de uma máquina, bem como do diagnóstico de falhas desta máquina. Isso é feito por meio da coleta de amostras de óleo lubrificante usado no motor, e subsequente análise das partículas de desgaste presentes nesse óleo. A partir disso, é possível determinar o tipo e a severidade do desgaste, quais os componentes afetados pelo desgaste, e os contaminantes presentes no óleo. Com esses dados em mãos, pode-se tomar a decisão quanto à manutenção corretiva adequada ou alongar o período de manutenção preventiva.

Existem dois tipos diferentes de análises ferrográficas: a ferrografia analítica e a ferrografia quantitativa.

2.3.1.1 *Ferrografia Analítica*

Essa técnica é importante para se determinar o mecanismo gerador do desgaste, uma vez que cada tipo de desgaste gera partículas com determinados formatos. Ela é feita por intermédio da análise visual da morfologia, cor das partículas, tamanho, distribuição e concentração no ferrograma. A Figura 2.2 mostra algumas classificações de partículas de desgaste (CUNHA, 2005).

1	ESFOLIAÇÃO  * Escamas * Superfície lisa * 0,5 - 5µm	2	CORTE POR ABRASÃO  * Cavacos * Existência de areia * 10 - 100µm
3	FADIGA (rolamento e engrenagem)  * Esferas * ~ Regulares * ~ 3µm	4	ARRASTAMENTO (engrenagens)  * Superfície rugosa * Coloração por temperatura * >20µm
5	DESGASTE SEVERO POR DESLIZAMENTO  * Estrias * Corte reto * > 20µm	6	PARTÍCULAS DIVERSAS  Areia Polímeros de fricção

Figura 2.2 - Classificação das partículas de desgaste. (CUNHA, 2005).

A incidência de cada partícula em uma determinada amostra é apontada em um gráfico de barras, como ilustra a Figura 2.3.

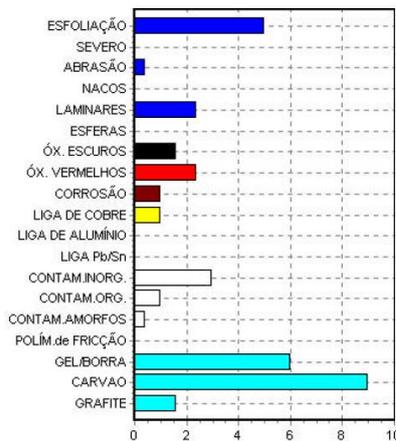


Figura 2.3 - Incidência de partículas de desgaste. (CUNHA, 2005).

2.3.1.2 Ferrografia Quantitativa

Através desta técnica, informações sobre o grau de severidade de desgaste de uma máquina são obtidas por meio da quantificação do tamanho e do número de partículas em suspensão em uma amostra de óleo.

O gráfico de tendências, Figura 2.4, pode ser obtido através da abordagem estatística dos dados obtidos por meio da ferrografia quantitativa, durante um determinado tempo de acompanhamento de uma máquina. Nesse gráfico, $L + S$ corresponde à concentração total de partículas, onde L corresponde ao valor para partículas grandes ($>5\mu\text{m}$) e S para as partículas pequenas ($<5\mu\text{m}$) (CUNHA, 2005).

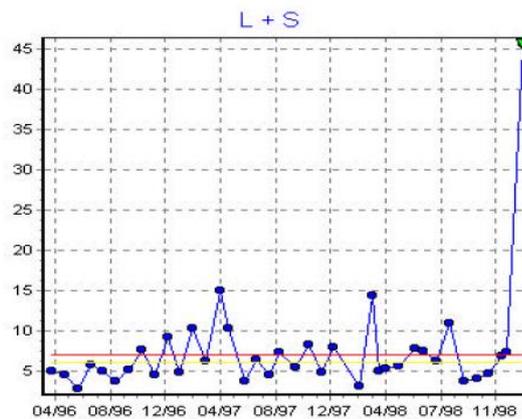


Figura 2.4 - Gráfico de tendências. (CUNHA, 2005).

A Figura 2.5, conhecida como Curva de Asa, mostra uma relação entre a evolução de desgaste, concentração de partículas de desgaste e tamanho das partículas de desgaste. Pode-se observar que, no desgaste normal, o tamanho das partículas varia de $1\mu\text{m}$ até próximo de $5\mu\text{m}$. Partículas maiores que $10\mu\text{m}$ é um forte sinal de alerta para a falha catastrófica do equipamento (CUNHA, 2005).

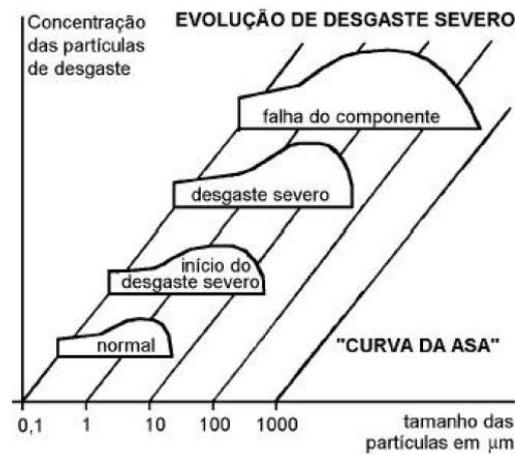


Figura 2.5 - Curva de asa. (CUNHA, 2005).

2.3.2 O Ferrógrafo Analítico

O ferrógrafo analítico, conforme Figura 2.6, é o aparato experimental necessário para se produzir o ferrograma. O ferrograma é uma lâmina de vidro onde ficam depositadas as partículas de desgaste oriundas de uma amostra de óleo. O procedimento de utilização deste dispositivo é muito simples: uma amostra de óleo dentro do tubo de ensaio é forçada (por aumento de pressão no interior do tubo provocado pelo bombeamento de ar filtrado) a passar pela mangueira descartável e, em seguida, a escorrer pela lâmina. O bombeamento do óleo também pode ser feito por meio de uma bomba peristáltica (LUBRIN).

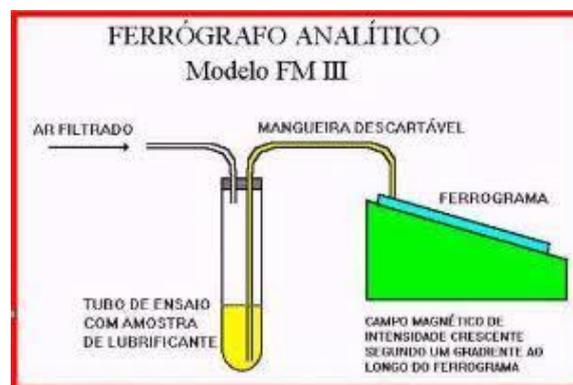


Figura 2.6 - Ilustração de um ferrógrafo analítico. (LUBRIN).

Abaixo da lâmina, localiza-se um imã de forte campo magnético. A lâmina possui uma pequena inclinação em relação a esse imã, como observa-se na Figura 2.7, fazendo com que o óleo escoe na direção desejada, desenvolvendo um gradiente magnético positivo na

direção descendente, facilitando a deposição de partículas menores. Usa-se uma vazão de 0,3 ml de óleo por minuto e um campo magnético de 3000 gauss (LUBRIN).

A Figura 2.8 mostra a disposição das partículas metálicas em um ferrograma típico. As partículas ferromagnéticas depositam-se de forma alinhada com as linhas do campo magnético. Devido à escolha do campo magnético e do fluxo de óleo, as partículas maiores que $5\mu\text{m}$ depositam-se na entrada do ferrograma e aquelas entre 1 e $5\mu\text{m}$, consideradas normais, depositam-se 6 mm abaixo. Partículas maiores que $15\mu\text{m}$ são consideradas partículas de desgaste severas (LUBRIN).

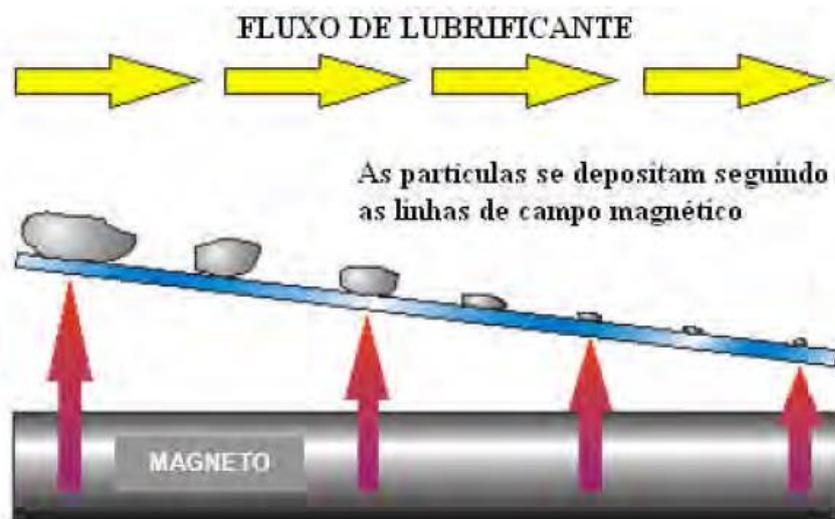


Figura 2.7 - Ilustração da forma de deposição das partículas de desgaste em um ferrograma. (LAGO, 2007).

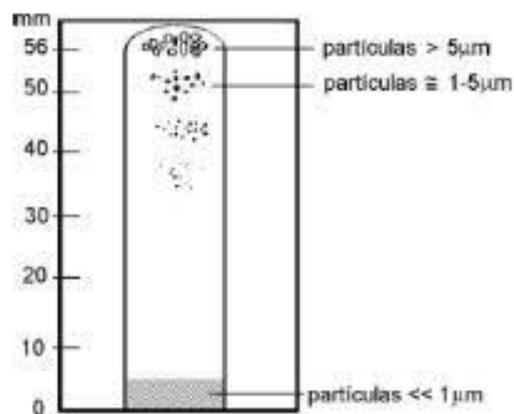


Figura 2.8 - Ilustração de um ferrograma. (LUBRIN).

A análise do ferrograma é feita de forma visual por meio da utilização de um ferrocópio, que é a união de um microscópio metalográfico e biológico. As informações

obtidas do ferrograma são: morfologia, cor das partículas, classificação por tamanhos, distribuição e concentração (LUBRIN).

2.4 Tribologia

Tribologia consiste no estudo dos fenômenos, físicos e químicos, e mecanismos de atrito, lubrificação e desgaste, aos quais as peças de uma máquina estão sujeitas. Para isso, é necessário analisar o tribossistema, que é composto pelo corpo, contracorpo, elemento interfacial e o meio (BRUNETTI, 2012).

Na Figura 2.9, pode-se observar os elementos de um tribossistema, formado por: corpo (anéis de segmento), contracorpo (cilindro), elemento interfacial (lubrificante) e meio (temperatura, pressão e gases).



Figura 2.9: Elementos de um Tribossistema: anéis de segmento, cilindro, lubrificante e meio. (BRUNETTI, 2012).

2.4.1 Contato entre Superfícies

É crucial entender a forma como as superfícies das peças entram em contato, pois isso influencia diretamente no formato, quantidade e tipo de partículas que serão encontradas no óleo lubrificante.

Para tanto, é necessário compreender o conceito de rugosidade, que são os pequenos desvios da superfície real em relação à ideal. Dessa forma, a superfície real apresenta-se, microscopicamente, com inúmeros picos e vales. Devido a isso, quando duas superfícies niveladas e posicionadas paralelamente são aproximadas uma da outra, o contato, inicialmente, dar-se-á somente nos poucos picos mais elevados, como ilustrado na Figura 2.10, fazendo com que a área em que as superfícies realmente entram em contato seja muito inferior à área de contato nominal (BRUNETTI, 2012).

Quando a carga, a qual as superfícies estão sujeitas, é aumentada, os picos mais altos se deformam, ou quebram, fazendo com que uma quantidade maior de asperezas das superfícies entre em contato, aumentando, dessa forma, a área na qual as superfícies realmente se tocam. Essas asperezas são as responsáveis pela força normal e pela força de atrito entre as duas superfícies (BRUNETTI, 2012).

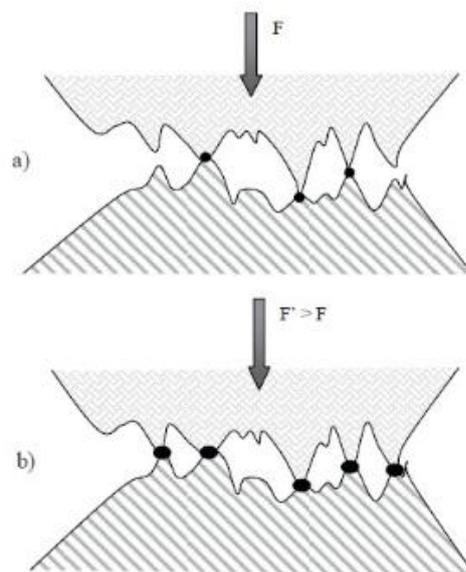


Figura 2.10: Ilustração do Contato entre Superfícies. (disponível em: <http://docplayer.com.br/48316085-Engenharia-de-superfícies-superfícies-em-contato.html>).

2.4.2 Desgaste (BRUNETTI - 2012)

Desgaste é o dano contínuo, envolvendo a retirada de material das superfícies em contato. Ele pode ser, basicamente, do tipo mecânico ou do tipo químico. O primeiro está relacionado aos processos de deslizamento, rolamento, abrasão, erosão e fadiga. Já o segundo está relacionado à corrosão.

A predominância de um ou de outro mecanismo de desgaste dependerá das condições reinantes no sistema tribológico, como propriedades físicas e químicas dos materiais, tipo de movimento, geometria, meio, solicitações (força e velocidade). O tipo de desgaste também influenciará diretamente nos tipos de partículas encontradas no óleo, bem como na quantidade dessas partículas.

É importante observar que os fenômenos tribológicos acontecem, predominantemente, na superfície. Além disso, as propriedades da superfície de determinada peça podem ser bastante diferentes das do núcleo.

A Figura 2.11 mostra um esquema simplificado das camadas encontradas em uma superfície. Podem-se observar quatro camadas diferentes na superfície de uma peça de mesmo material. A camada de óxido, em alguns casos, tem a função de proteger as camadas mais internas da superfície da corrosão, como ocorre com as peças de alumínio, que formam uma camada de óxidos de alumínio, evitando o contato do metal com o meio.

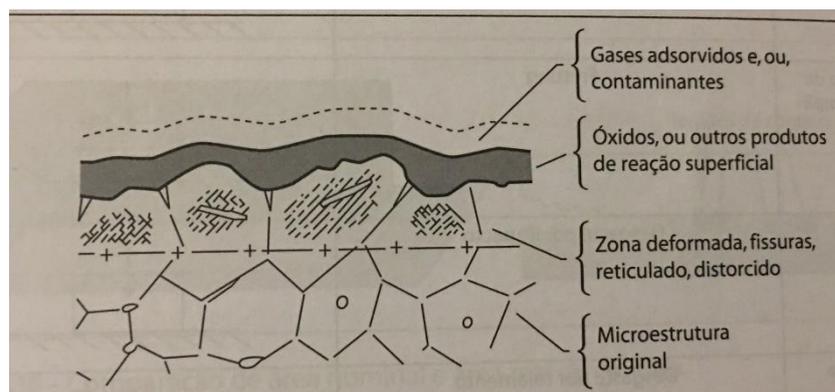


Figura 2.11: Esquema das Camadas de uma Superfície. (BRUNETTI, 2012).

2.5 Partículas Presentes na Amostra

2.5.1 Partículas Ferrosas Geradas por Desgaste

A maior parte das partículas presentes em amostras de óleos lubrificante são do tipo ferrosas, uma vez que o ferro está presente na maioria dos componentes que estão sujeitos ao contato entre si.

Geralmente, a identificação dessas partículas fica facilitada quando elas são aquecidas a mais de 300 °C, apresentando uma coloração azul, se for aço de baixa liga, uma cor palha, se for aço de média liga, e não sofrendo alteração de cor se for aço de alta liga (LUBRIN).

Nesse tipo de desgaste, a taxa com que as partículas são geradas e sua concentração podem apresentar uma elevação muito rápida, o que é, geralmente, seguido por um crescimento nas dimensões das partículas, podendo chegar a mais de 100 µm. Sob essas condições, a falha catastrófica deve ser pouco provável, porém, uma elevada taxa de desgaste provoca um desgaste veloz e indesejável das peças. Devido a isso, deve-se tomar cuidado na avaliação do estado operacional do equipamento. Os contaminantes podem ter uma influência considerável na produção de partículas devido a esse tipo de desgaste (LAGO, 2007).

Os principais tipos de desgaste, aos quais os componentes de um motor estão sujeitos são: esfoliação, abrasão, fadiga de rolamento e deslizamento. Cada um deles será explicado, brevemente, nos tópicos a seguir.

2.5.1.1 Desgaste por Esfoliação e Amaciamento

As partículas produzidas devido ao desgaste por esfoliação possuem uma forma parecida com escamas largas e finas, com uma superfície lisa e possuem um formato arredondado. Seu comprimento pode atingir, em casos específicos, até 15 µm, porém, variam, normalmente, entre 0,5 e 5 µm. Elas são formadas quando o motor está operando em regimes normais, sendo, dessa forma, consideradas partículas de desgaste normal. É aceitável observar uma certa quantidade desse tipo de partícula em uma amostra e, à medida que essa forma de desgaste estiver ocorrendo em níveis não muito elevados, existe uma boa probabilidade de não ocorrer qualquer defeito catastrófico na máquina. Porém, a observação da presença de grande quantidade dessas partículas, na amostra de óleo, pode ser um indício de desgaste acima do normal da peça. Esse efeito pode ser apaziguado com o uso de lubrificantes de elevado desempenho (LUBRIN).

A Figura 2.12 ilustra a presença em uma amostra de óleo das partículas geradas por desgaste normal de uma máquina.

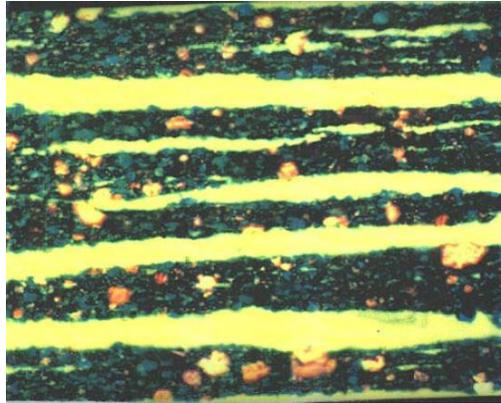


Figura 2.12 - Partículas geradas por desgaste normal de uma máquina. (LUBRIN).

Quando uma máquina começa a ser utilizada, ou quando peças desgastadas são substituídas por peças novas, ocorre um processo de adaptação mútua entre as superfícies das peças em contato direto. A esse fenômeno, dá-se o nome de amaciamento.

O desgaste devido ao amaciamento ocorre, principalmente, em função das irregularidades superficiais decorrentes dos processos de usinagem das peças, bem como de defeitos provenientes dos próprios materiais que as formam. Em movimentos de rolamento, estas irregularidades podem acarretar a retirada forçada de material da peça por fadiga, formando “*pittings*” de pequenas dimensões na parte mais externa da peça. Esse tipo de desgaste produz, normalmente, elevadas quantidades de partículas, cisalhadas em movimento de deslizamento, com formatos de prismas, que possuem aparência típicas de processos de usinagem. Como essas partículas ficam misturadas ao óleo lubrificante, deve-se efetuar o “*flushing*” do óleo da máquina, após trinta dias de utilização, retirando, dessa forma, essas partículas do óleo. Caso isso não seja feito, essas partículas podem provocar outros tipos de desgaste, mais prejudiciais à máquina (LUBRIN).

Durante o processo de amaciamento, não ocorre, necessariamente, apenas esse tipo de desgaste, pelo contrário, as partículas formadas, durante esse processo, que ficam misturadas ao óleo lubrificante, podem provocar, por exemplo, desgaste por abrasão a três corpos.

A tendência é que, com certo tempo de utilização do motor, esse processo de amaciamento vá diminuindo cada vez mais, uma vez que as peças chegam a um ponto de acomodação tal que o desgaste deixa de ser predominantemente por amaciamento, passando a prevalecer outros tipos de desgaste. A Figura 2.13 mostra partículas geradas durante esse processo de amaciamento.

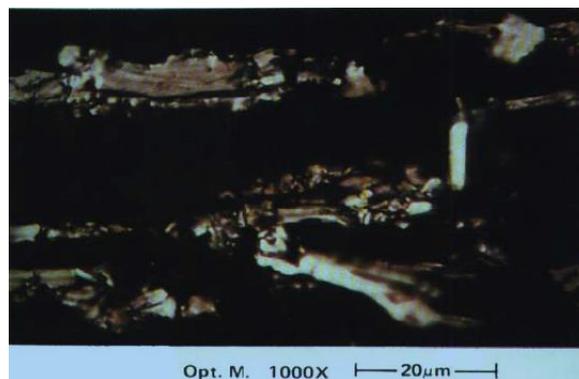


Figura 2.13 - Partículas geradas durante o amaciamento de uma máquina. (LUBRIN).

2.5.1.2 *Desgaste por Abrasão*

Quando uma superfície ou partícula adentra em outra superfície, com conseqüente retirada de material, ocorre desgaste por abrasão. Como conseqüência, são formadas partículas finas e compridas (LUBRIN).

Pode-se distinguir dois tipos principais de desgaste por abrasão: abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos.

2.5.1.2.1 *Desgaste por Abrasão a Dois Corpos*

É o tipo de desgaste que ocorre quando uma superfície áspera e de elevada dureza, ou uma superfície de baixa dureza, que possui partículas duras encrustadas nela, desliza sobre uma superfície de dureza inferior, produzindo, nesta, inúmeros riscos (CUNHA, 2005).

Para que isso ocorra, é necessário que a superfície de dureza superior possua imperfeições mais proeminentes do que o nível médio das imperfeições, de tal forma que aquelas imperfeições serão as responsáveis por arranhar a outra superfície. Também pode

ocorrer de os cantos vivos da primeira superfície, devido a um desalinhamento, conseguirem riscar a outra. No caso da superfície macia, com partículas duras encrustadas, as partículas duras que estiverem um pouco acima do nível da superfície “lisa” serão as responsáveis por produzir as ranhuras na outra superfície.

Esse tipo de desgaste é muito comum em casos de desalinhamentos entre duas superfícies. Nessas ocorrências, uma das quinas da superfície de uma peça pode tocar a superfície da outra peça, gerando, dessa forma, partículas finas, compridas e, normalmente, retas. Essas partículas podem atingir dimensões em torno de 25 a 100 μm . Essas superfícies passam por esse processo por certo período, até que, a partir de determinado instante, o próprio desgaste será responsável por eliminar as interferências físicas que o iniciaram (desalinhamento, partículas incrustadas), fazendo com que o desgaste diminua ou até mesmo cesse (LUBRIN).

O efeito da carga sobre esse tipo de desgaste pode ser considerável, pois, quando se aumenta a pressão sobre as superfícies, elas ficam sujeitas a uma força de contato maior, fazendo com que as imperfeições da superfície mais dura penetrem mais profundamente na superfície mais mole, o que provocará um desgaste ainda mais acentuado.

Na Figura 2.14, pode-se observar, no canto superior direito, partículas formadas por esse tipo de desgaste.



Figura 2.14 - Desgaste por abrasão a dois corpos. (LUBRIN).

2.5.1.2.2 Desgaste por Abrasão a Três Corpos

Esse tipo de desgaste ocorre quando as partículas duras podem deslizar livremente entre as duas superfícies, podendo provocar desgaste em ambas. A taxa de desgaste, nesse caso, é, geralmente, menor que no caso anterior (CUNHA, 2005).

As partículas duras, causadoras desse tipo de desgaste, podem ser provenientes da deterioração das próprias superfícies em questão, de partículas de desgaste de outras superfícies do motor, ou até mesmo de contaminantes externos à máquina, como, por exemplo, a areia.

Abrasão a três corpos ocorre, normalmente, devido à contaminação por areia abrasiva. Porém, essas partículas de areia devem possuir dimensões próximas às das folgas entre as superfícies. Os fragmentos de sílica, menores que uma determinada folga, passam direto por entre as superfícies sem provocar nenhum dano; as maiores não conseguem entrar na folga, e, dessa forma, também não provocam danos. O caso mais crítico é quando as partículas de areia possuem dimensões próximas as da folga, pois elas engastam em uma das superfícies e começam a usinar a outra, gerando partículas finas, compridas e encaracoladas. O tamanho médio dessas partículas é de aproximadamente 50 μm . O procedimento mais eficiente para evitar esse tipo de desgaste é instalar um sistema de filtragem que seja capaz de separar essas partículas do óleo lubrificante (LUBRIN).

Quando essas partículas duras se encrustam em uma das superfícies, o procedimento de desgaste torna-se semelhante ao observado no desgaste a dois corpos, quando uma superfície mole possuía partículas duras incrustadas em sua superfície. A Figura 2.15 ilustra as partículas observadas no desgaste a três corpos.

O desgaste provocado por uma partícula abrasiva pode ser decorrente de um processo de microcorte, por um processo de fadiga causada pelo microsulcamento, microfadiga, ou por microlascamentos, se a superfície for frágil (TOMANIK, 2000).

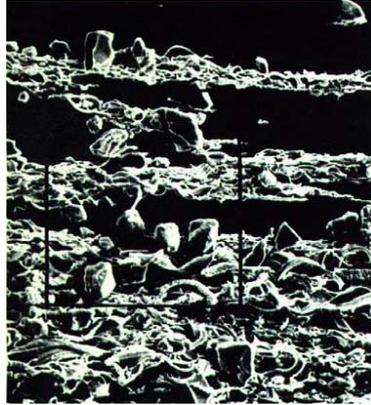


Figura 2.15 - Desgaste abrasivo a três corpos. (LUBRIN).

2.5.1.3 *Desgaste por Fadiga de Rolamento*

Esse tipo de desgaste ocorre em superfícies sujeitas a contato do tipo rolamento. Nessas superfícies, observa-se, fisicamente, o surgimento de tensões de cisalhamento devido ao contato entre as duas superfícies, cujo valor máximo ocorre um pouco abaixo da superfície da peça. Com o prosseguimento do processo de rolamento, a região em que o contato ocorre movimenta-se continuamente, fazendo com que a tensão de cisalhamento fique oscilando entre zero e um valor máximo, produzindo, dessa forma, tensões cíclicas que podem, caso haja tempo suficiente, resultar em uma falha por fadiga do material (CUNHA, 2005).

De acordo com CUNHA (2005), esse tipo de situação pode fazer com que sejam formadas trincas logo abaixo da superfície que, devido ao carregamento cíclico, pode crescer até alcançar a superfície, lascando-a e produzindo uma partícula superficial macroscópica com a consequente criação de covas (“*pitting*”) ou lascamento (“*spalling*”). O processo de “*pitting*” é responsável por produzir partículas com pequenas áreas superficiais, chamadas de “*pite*”. Já o “*spalling*” é um processo que se origina com trincas sub-superficiais, formando partículas em forma de lascas finas, chamadas de “*spall*”.

Os mecanismos de desgaste por fadiga podem ocorrer em condições de desgaste por deslizamento, porém, o mais comum é que ocorra onde existe contato por rolamento, onde se encontra a situação de tensões altas e de deslizamento pequeno. Esse tipo de contato também é observado em regimes de lubrificação elastohidrodinâmica, em que a interação adesiva é reduzida ou ausente. As peças, onde esse tipo de desgaste é, normalmente,

observado, são rolamentos de esferas e de roletes, dentes de engrenagens e cames (LAGO, 2007).

Essas peças apresentam a característica em comum de sofrerem carregamentos cíclicos, com intervalos de tempo bem definidos, e onde a carga, em determinado ponto, varia de zero até um máximo, condição primitiva para que ocorra a fadiga por rolamento.

Interessante observar que, no caso de uma lubrificação do tipo elastohidrodinâmica efetiva, mesmo as peças não entrando em contato diretamente uma com a outra, que é uma característica desse tipo de regime de lubrificação, as forças devido ao carregamento são transferidas de uma peça para outra por meio do óleo lubrificante, semelhante ao que ocorre em sistemas hidráulicos. Caso o óleo consiga penetrar nas trincas formadas na superfície, isso pode fazer com que as tensões no interior delas aumentem consideravelmente, agravando a situação de desgaste.

De acordo com CUNHA (2005), a probabilidade que uma superfície tem para falhar devido a um processo de fadiga pode ser diminuída pela redução da carga e do deslizamento. Dessa forma, pode-se utilizar lubrificantes mais adequados para essa situação em específico. Esses lubrificantes devem ser capazes de reduzir o atrito de rolamento entre as peças, reduzindo, assim, a tensão cisalhante tangencial na superfície e a tensão interna resistente à tração. Além disso, um atrito reduzido também tem como consequência a produção de menos calor, reduzindo as tensões decorrentes das dilatações e contrações térmicas. Por último, esse lubrificante deve ser capaz de formar um filme cobrindo as duas superfícies, de tal forma que favoreça a distribuição da pressão sobre a área em contato.

Três tipos de partículas diferentes são, normalmente, relacionados à fadiga de rolamento: partículas esféricas, partículas de fadiga em forma de lascas, chamadas de NACO, e partículas laminares (LUBRIN).

2.5.1.3.1 Desgaste por Fadiga de Rolamento - Partículas Esféricas

Partículas esféricas são produzidas no interior das microtrincas formadas quando a superfície fica sujeita a carregamentos cíclicos, ocasionando a fadiga do metal. Das

superfícies dessas microtrincas, pequenas partículas de metal, com formatos variados, desprendem-se e, à medida que o processo de carga alternada naquele ponto avança, as superfícies das microtrincas passam a se movimentar uma em relação à outra, em movimentos circulares. Esse tipo de movimento faz com que as superfícies das microtrincas moldem as partículas desprendidas de tal forma que, aos poucos, elas adquirem um formato esférico e são expulsas das microtrincas em quantidades que chegam a milhões de partículas, com dimensões geralmente entre 1 e 5 μm (LUBRIN).

A Figura 2.16 ilustra um exemplo de partículas esféricas com diâmetro aproximado de 2 μm .

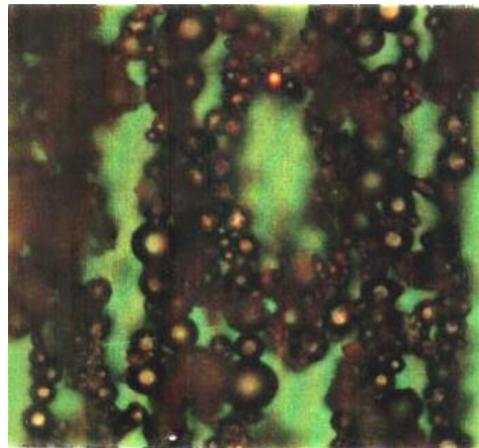


Figura 2.16 - Partículas esféricas. (LUBRIN).

Importante salientar que, de acordo com LAGO (2007), a presença dessas partículas, na amostra de óleo lubrificante, é um indicativo de uma provável falha, pois elas são formadas antes que as partículas em forma de lasca surjam, o que seria um indicativo de desgaste mais severo.

Partículas esféricas podem se originar de diferentes fontes além da fadiga do contato rolante. Elas podem ser produzidas por meio de processos de cavitação erosiva, soldagem e retificação. Porém, uma forma de distinguir essas partículas é por meio do tamanho, pois estas últimas possuem, normalmente, dimensões muito maiores, variando entre 1 μm e 100 μm , do que as formadas por fadiga do metal. Outra fonte de partículas esféricas são os próprios óleos novos que, não raramente, contêm algumas partículas esféricas que têm origem no próprio recipiente durante o processo industrial (LAGO, 2007).

2.5.1.3.2 *Desgaste por Fadiga de Rolamento - Partículas em Forma de Lascas*

Após a formação das partículas esféricas, caso o carregamento sobre a peça continue, as microtrincas progridem, atingindo a superfície. Nesse instante, forma-se um buraco, ao qual se dá o nome de “*pitting*”, devido ao desprendimento de pequenas partículas de metal. Estas partículas possuem um formato plano, contornos irregulares e o comprimento é bem maior que sua espessura, possuindo uma razão espessura-comprimento de aproximadamente 1:10. O comprimento destas partículas pode alcançar cerca de 100 μm , durante o período de microfalhas, podendo chegar a dimensões bem mais elevadas perto da falha catastrófica (LUBRIN).

É relativamente comum o surgimento de elevada quantidade de partículas de fadiga, com comprimento de aproximadamente 10 μm , nos estágios iniciais da formação dos “*pittings*”. Em algumas situações, porém, pode ocorrer de surgirem partículas de fadiga sem que tenham sido formadas partículas esféricas antes, como nos casos de elevada carga sobre o rolamento ou em sistemas limpos. A Figura 2.17 mostra uma imagem desse tipo de partícula (LUBRIN).

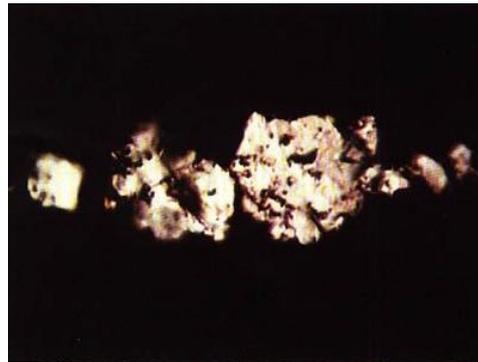


Figura 2.17 - Partículas de fadiga em forma de lascas. (LUBRIN).

2.5.1.3.3 *Desgaste por Fadiga de Rolamento - Partículas Laminares*

O mais aceito, atualmente, é que as partículas laminares surgem a partir das partículas de fadiga em forma de lascas ou esféricas. Essas duas últimas partículas são moldadas pelas superfícies em rolamento, no espaço entre as duas superfícies, até que se transformem nas partículas laminares. Devido a isso, elas possuem um formato bastante fino,

apresentando comprimentos variando entre 20 e 50 μm , e uma razão espessura-comprimento de aproximadamente 1:30 (LUBRIN).

Apesar desse tipo de partícula ser produzida durante toda a vida da peça, ocorre uma elevação considerável na sua produção quando os outros dois tipos de partículas de fadiga começam a ser produzidas. Dessa forma, um aumento na concentração de partículas de fadiga pode ser um indício de que algum problema esteja ocorrendo, por exemplo, nas superfícies dos rolamentos (LUBRIN).

Partículas laminares, com comprimentos acima de 100 μm , podem ser produzidas quando as peças ficam sujeitas a elevadas cargas e baixas velocidades. Importante salientar, também, que o tamanho e a quantidade de partículas geradas nas engrenagens são muito mais elevados do que as geradas nos mancais de rolamentos. A Figura 2.18 mostra um exemplo de partículas laminares (LUBRIN).

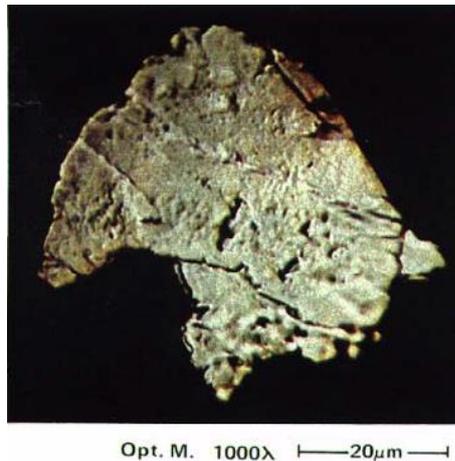


Figura 2.18 - Partícula laminar. (LUBRIN).

2.5.1.4 *Desgaste Severo Por Deslizamento*

O desgaste severo por deslizamento pode ocorrer sob condições de carregamento excessivo na superfície, elevada rotação de funcionamento do motor ou por lubrificação inadequada. As partículas resultantes desse tipo de desgaste são identificadas por estrias paralelas em sua superfície resultantes do processo de deslizamento. São partículas geralmente muito afiladas, alcançando um comprimento de aproximadamente 20 μm , sendo maiores que as partículas de desgaste normal por atrito (LAGO, 2007).

Essas partículas, quando produzidas sob condições pouco severas, podem possuir dimensões parecidas com as partículas de desgaste normal. A diferença, nesse caso, consiste no fato de que as de desgaste severo possuem aparência rugosa e formas irregulares, normalmente, possuindo farpas. Este tipo de desgaste severo se processa em todas as partes do motor onde se observa deslizamento entre as superfícies das peças. O mais provável é que ocorra entre os dentes de engrenagens, os quais entram em contato direto (LUBRIN).

Quando ocorre o contato metálico entre as superfícies, o atrito devido ao deslizamento se torna muito severo. Isso é decorrente de um processo de aumento do carregamento sobre as superfícies ou redução da velocidade, fazendo com que a película de óleo lubrificante não suporte mais a carga, permitindo, por isso, o contato entre elas. Entre outras consequências, isso provoca a liberação de calor, o que pode ocasionar a oxidação de algumas partículas, as quais adquirem coloração escura (LUBRIN).

Quando se observa a presença de partículas com coloração palha ou azul, é um indício de que elas foram formadas em temperaturas acima de 300°C e são partículas originadas de aço de média liga ou baixa liga (LUBRIN).

Existe uma sequência lógica de surgimento das partículas de desgaste. À medida que o carregamento vai aumentando, são produzidas, inicialmente, as partículas de esfoliação, que vão elevando suas dimensões, e, por último, surgem as partículas de deslizamento, primeiro as do tipo leve e, posteriormente, as do tipo severo. Depois que esse processo começa, são produzidas, normalmente, grandes quantidades de partículas (LUBRIN).

A Figura 2.19 mostra partículas formadas devido ao desgaste severo por deslizamento. Pode-se observar as formas irregulares e o aspecto rugoso dessas partículas.

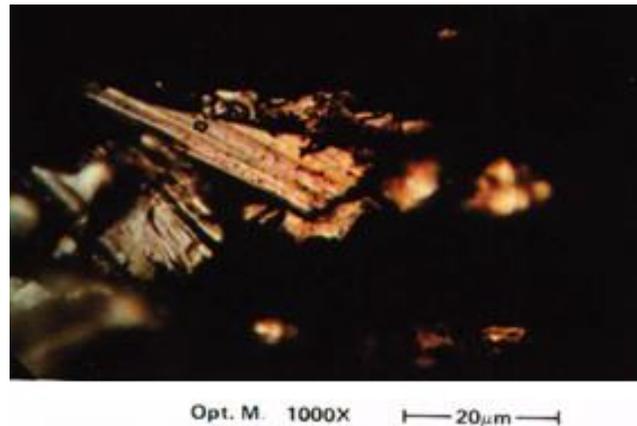


Figura 2.19 - Partículas de desgaste severo por deslizamento. (LUBRIN).

2.5.2 Partículas Metálicas não Ferrosas Geradas Por Desgaste

As partículas de material ferromagnético apresentam um padrão de depósito no ferrograma bem estabelecido, como comentado acima. Já as partículas de material não ferrosas que não são influenciadas pelo campo depositam-se, aleatoriamente, ao longo de todo o ferrograma. Para essas partículas, o que determina o seu local de decantação é apenas a força da gravidade. Essa forma de deposição é uma das maneiras de distinguir essas partículas metálicas não ferrosas das partículas ferrosas (LUBRIN).

As partículas produzidas por metais não ferrosos geralmente possuem propriedades parecidas com as exibidas por partículas ferrosas. A principal característica que as diferenciam dos metálicos não ferrosos é sua coloração (LAGO, 2007).

2.5.2.1 Partículas de Alumínio

Dentre os metais conhecidos como brancos (prata, alumínio, cromo, zinco, entre outros), o alumínio é o que mais é observado em motores. Ele é solúvel em solução 0,1 N de HCl a 90°C. Esse procedimento é utilizado para diferenciar essas partículas de outras partículas não ferrosas (LUBRIN).

A Figura 2.20 mostra uma partícula de alumínio com tamanho aproximado de 30 µm. Pode-se observar seu contorno irregular e a rugosidade da superfície.

As partículas de alumínio, geralmente, apresentam contorno irregular da superfície, o que dá um aspecto rugoso a ela. Quando observadas sob luz refletida, apresentam uma coloração prateado cinzento. Seu comprimento pode oscilar significativamente, mas, comumente, possuem dimensões elevadas, entre 25 e 500 μm (LAGO, 2007).

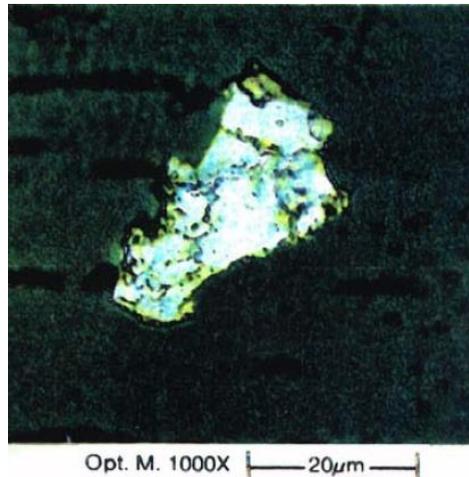


Figura 2.20 - Partículas de alumínio. (LUBRIN).

2.5.2.2 *Ligas de Cobre*

As partículas originadas a partir de ligas de cobre são, prontamente, identificadas devido à sua coloração amarelo avermelhado ou marrom avermelhado. Entretanto, outras partículas metálicas, quando são produzidas em condições de temperatura elevada, podem, também, apresentar coloração amarelado ou palha, dificultando a distinção das partículas de cobre. No caso específico das partículas ferromagnéticas com coloração palha, seria de fácil diferenciação, pois estas, devido ao seu padrão de deposição no ferrograma, alinhar-se-iam com as linhas de força magnética, diferentemente das partículas de cobre, que decantariam de forma aleatória. O tamanho dessas partículas de cobre pode oscilar entre 2 μm e 100 μm (LUBRIN).

A Figura 2.21 ilustra uma partícula, com comprimento aproximado de 20 μm , gerada a partir de uma peça formada de liga de cobre.

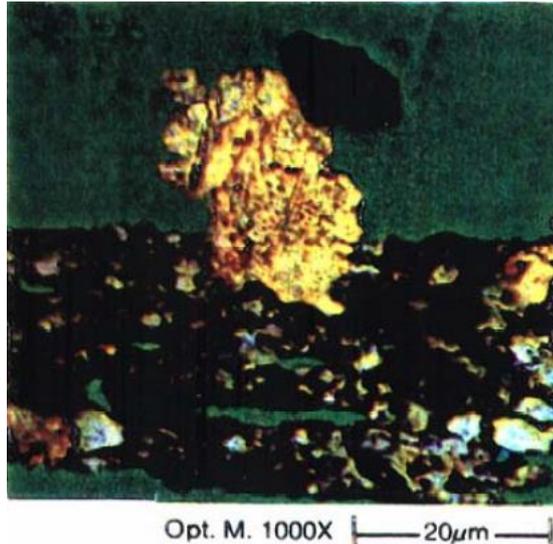


Figura 2.21 - Partícula de liga de cobre. (LUBRIN).

2.5.2.3 *Metal Patente*

Difícilmente, partículas formadas a partir de metal patente, ligas de estanho e chumbo, serão encontradas em ferrogramas, pois, como seus pontos de fusão são muito baixos, 231,9 °C e 327,5 °C, respectivamente, o processo de desgaste das peças que os contêm não chega a gerar partículas desses metais, derretendo-os antes que isso aconteça. Nos casos em que são encontradas partículas de Pb/Sn, elas, muito provavelmente, estarão oxidadas, uma vez que esses metais sofrem oxidação com bastante facilidade, mesmo em temperaturas consideradas baixas em metalurgia. Realmente, partículas nesse estado são encontradas nos desgastes oxidativos de mancais que utilizam chumbo/estanho como metal patente. Isso ocorre, principalmente, nas partidas e paradas das máquinas, caso em que o filme de óleo lubrificante não está completamente formado, devido à baixa velocidade do eixo, o que provoca o contato direto do eixo com o metal patente. Observa-se que, quando esses mancais são desmontados, eles apresentam uma camada escura de Pb/Sn oxidados (LUBRIN).

Além desse tipo de desgaste, mancais com chumbo/estanho podem sofrer mais dois tipos de desgastes, que são a contaminação e o desgaste corrosivo. A contaminação por partículas abrasivas provoca desgaste pelo mecanismo de abrasão a 3 corpos nos eixos. Em ferrogramas de situações de desgastes corrosivos, observa-se um depósito pesado de partículas finas no final da lâmina. Esse tipo de desgaste acontece, não raramente, em motores diesel, pois o enxofre do óleo diesel tem a tendência de formar ácido sulfúrico quando esse

combustível contamina o óleo lubrificante. Estes ácidos atacam os mancais de Pb/Sn. O chumbo é mais suscetível à corrosão que o estanho (LUBRIN).

Importante salientar, também, que, como o enxofre reage com a água para gerar o ácido, é necessário, também, que o óleo lubrificante do motor esteja com certo grau de contaminação por água.

O conhecimento dos detalhes de construção das peças de um motor, na maioria dos casos, é de suma importância para a análise ferrográfica. Como exemplo, pode-se citar o caso dos mancais que possuem uma fina camada de chumbo/estanho sobre uma superfície formada por liga de cobre. Essa técnica é importante porque une a alta capacidade de resistência à fadiga oferecida pela liga de cobre com as propriedades decorrentes dos metais patentes. Devido a essa particularidade de construção, desgastes mais severos, nesses mancais, serão facilmente identificados, pois os ferrogramas obtidos do óleo apresentarão, muito provavelmente, partículas de liga de cobre, indicando que a camada de metal patente foi rompida (LUBRIN).

A Figura 2.22 mostra exemplos de partículas formadas a partir de ligas de chumbo/estanho, com dimensão aproximada de 20 μm . Os pontos azuis, na imagem à esquerda, e os pontos multicoloridos, na imagem à direita, são sinais de oxidação.

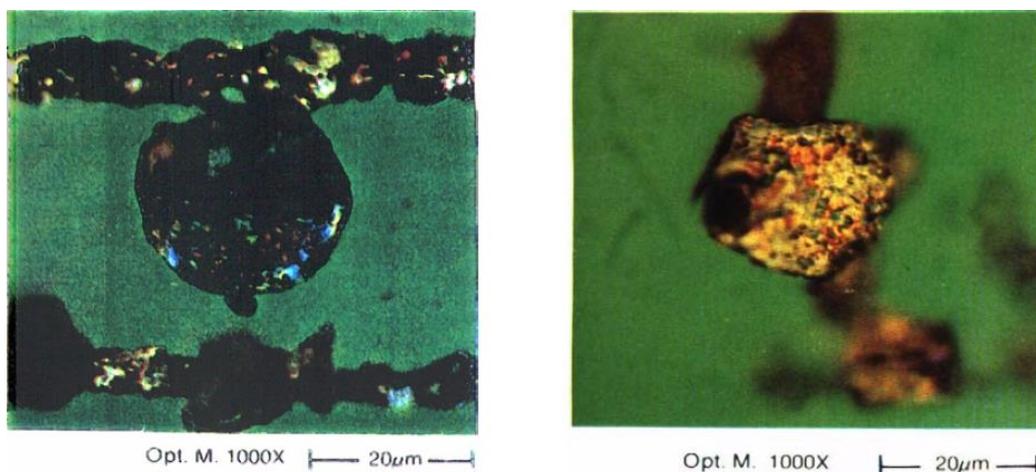


Figura 2.22 - Partícula de Pb/Sn. (LUBRIN).

2.5.3 Óxidos de Ferro

Os óxidos de ferro estão divididos em duas categorias: os óxidos vermelhos e os óxidos escuros. Normalmente, os óxidos vermelhos são produtos de uma reação química do ferro com o oxigênio, que se processa em temperatura ambiente, e é um indício da presença de água no óleo lubrificante. Já os óxidos escuros se formam na presença de temperaturas mais elevadas, decorrentes da liberação de calor excessivo, e é um indício de que existe algum problema de lubrificação (LUBRIN).

2.5.3.1 *Óxidos Vermelhos*

Óxidos vermelhos são bastante comuns em casos de contaminação do óleo com água. Importante salientar que não é obrigatório que exista água, na amostra de óleo, no momento da sua coleta, para que esse tipo de partícula seja observado. Pode ocorrer de o sistema ter sido contaminado com água antes da coleta da amostra, sendo produzidas, dessa forma, as partículas de óxidos vermelho, e a água, por algum mecanismo, intencional ou não, foi retirada do sistema antes da coleta (LUBRIN).

Quando elas são formadas em situações de fraca lubrificação, possuem um formato achatado, e são partículas de desgaste oriundas de deslizamento, que são observadas no microscópio com coloração cinza em luz refletida branca, e marrom avermelhado fraco quando submetidas à luz branca transmitida. Além disso, em luz bicromática (luz vermelha refletida e verde transmitida), as superfícies destas partículas são bastante refletidas (LUBRIN).

A Figura 2.23 mostra esse tipo de óxido vermelho, formado em uma condição de lubrificação pobre. As três imagens apresentam as mesmas partículas sob diferentes configurações de luz refletida e transmitida do microscópio. À esquerda, são observadas em luz bicromática; no meio, em luz branca refletida e luz verde transmitida; e, a direita, em luz branca transmitida.

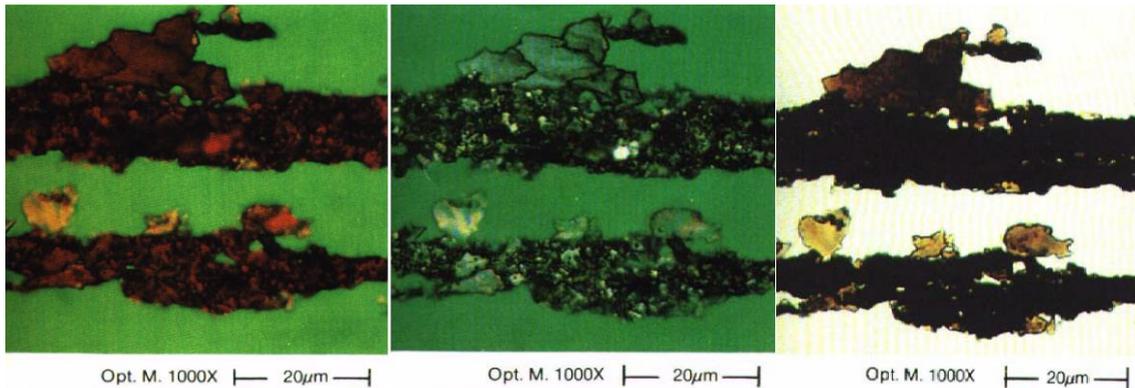


Figura 2.23 - Partículas de óxido vermelho. A esquerda, em luz bicromática; no meio, em luz branca refletida e luz verde transmitida; e a direita em luz branca transmitida. (Modificada de Lago, 2007).

2.5.3.2 Óxidos Escuros

Partículas de óxidos escuros são produzidas em situações graves de lubrificação inadequada. Eles se apresentam em aglomerados e possuem uma superfície rochosa. Quando observadas no limite inferior de resolução do microscópio óptico, apresentam pequenos pontos azuis e laranjas (LUBRIN).

Essas partículas são parecidas com as de óxido de ferro vermelho, a diferença consiste no fato de que as escuras possuem um núcleo de metal livre e, dessa forma, não são translúcidas. Outra diferença é a presença, normalmente, de manchas do metal livre em suas superfícies (pontos azuis e laranjas). Estas partículas apresentam esse aspecto devido à forma como são produzidas: na presença de altas temperaturas provocadas pela liberação de calor em função do atrito entre as peças. Dessa forma, a presença dessas é um indício de um desgaste mais severo dos componentes. Mais grave ainda, é quando surgem partículas grandes, parcialmente oxidadas, que indicam a falha catastrófica de superfície, consequência de um desgaste anormal (LAGO, 2007).

A imagem da esquerda, da Figura 2.24, mostra partículas de desgaste normal e partículas de oxidação parcial. As partículas parcialmente oxidadas são mostradas com coloração cinza escuro e as partículas de metal livre são vistas como brancas e lustrosas. Na imagem da direita, na Figura 2.24, observa-se o mesmo ferrograma, com a mesma resolução e ampliação do microscópio, após aquecimento da lâmina a cerca de 330°C. Percebe-se que as partículas oxidadas continuam com a mesma coloração, enquanto os metais livres são mostrados com coloração palha (LUBRIN).

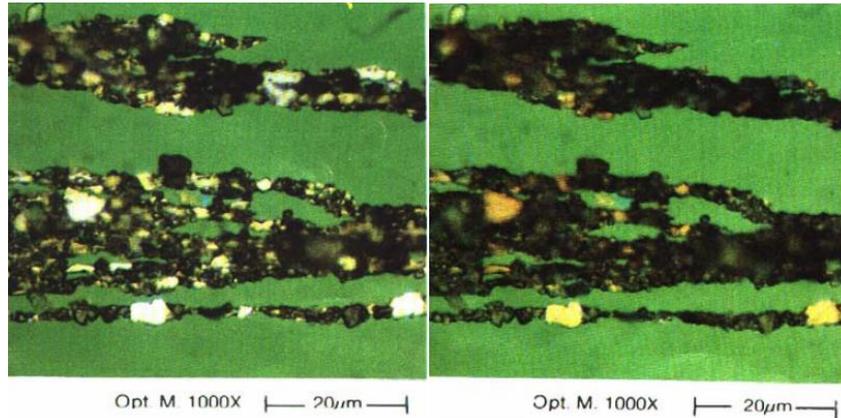


Figura 2.24 - Partículas de óxido escuro. À esquerda, em temperatura ambiente; e, à direita, com ferrograma aquecido a 330°C. (Modificada de Lago, 2007).

2.5.4 Partículas Misturadas

Não só partículas metálicas podem ser observadas em uma amostra de óleo lubrificante, também se pode encontrar cristais não metálicos e amorfos não metálicos. Uma boa forma de identificar este tipo de partícula é por meio da utilização das propriedades de polarização do microscópio óptico (CUNHA, 2005).

Na Figura 2.25, pode-se observar alguns exemplos de partículas não metálicas vistas em microscópio óptico. Na Tabela 2.1, são exibidas algumas indicações de como são identificadas algumas dessas partículas.

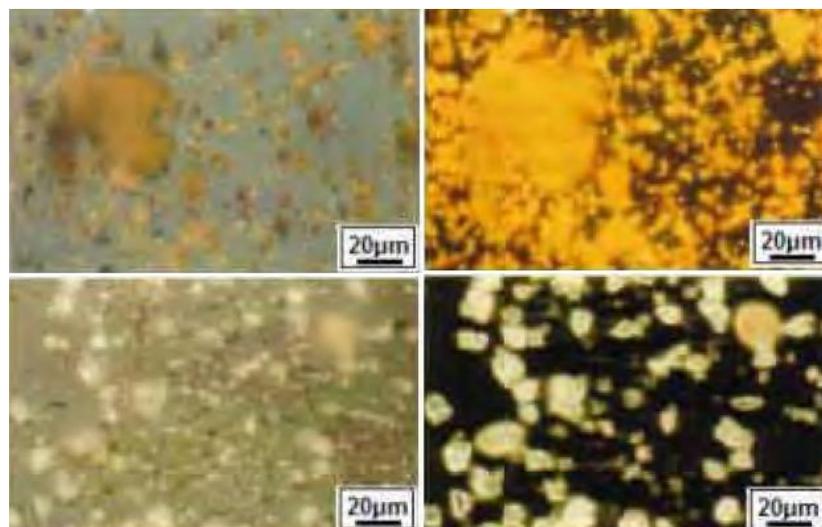


Figura 2.25 - partículas ferrosas de uma óxido, imagens superiores; Partículas de sílica, imagens inferiores. (LAGO, 2007).

Tabela 2.1 - Formas de se identificar algumas partículas.

Tipo de Partícula	Luz Normal Refletida	Luz Polarizada Transmitida	Luz Polarizada Refletida
Óxido (Ferroso)	Cor marrom clara contra um fundo branco.	De marrom laranja claro a escuro de acordo com a densidade - fundo cinzento.	Laranja / marrom brilhante contra fundo preto.
Cristalino não metálico (Sílica)	Cor cinza transparente contra um fundo branco.	Branca prata brilhante contra um fundo cinzento.	Branca prata brilhante contra fundo preto.
Polímero	Creme / marrom fosco com aparência tipo de lã de algodão contra um fundo branco.	Cor bege brilhante contra um fundo cinzento.	Cor bege brilhante contra fundo preto.

Fonte: (LAGO, 2007).

2.5.5 Contaminantes Originados dos Filtros de Óleo Lubrificante

Os filtros de óleo lubrificante desempenham uma função primordial no sistema de lubrificação do motor e, conseqüentemente, são essenciais para o bom funcionamento desta máquina. Esses elementos são responsáveis por filtrar todos os tipos de partículas, tanto as originadas no próprio motor, como as provenientes do meio externo. Porém, os próprios filtros são fontes de geração de algumas partículas, que acabam por contaminar o sistema.

O material mais comum que compõe os filtros é o papel, que, não raramente, deteriora-se e libera fibras de celulose. Isso, por se só, não significa um problema grave, porém, à medida que grandes quantidades começam a ser observadas no ferrograma, pode ser um indício de uma falha mais grave no sistema de filtragem, como o rompimento do filtro. Geralmente, nesse tipo de situação, também são observadas elevadas quantidades de contaminantes e partículas de desgaste. A Figura 2.26 mostra três tipos diferentes de fibras. Na imagem da esquerda, observam-se fibras de celulose em luz polarizada transmitida. Na imagem do meio, analisam-se fibras de vidro. O centro desse tipo de partícula não consegue bloquear a luz polarizada e o eixo dispersa e reflete esse tipo de luz, fazendo-o brilhar. Devido a isso, esse tipo é de fácil reconhecimento. Já a imagem da direita mostra uma fibra sintética, de poliéster, em luz polarizada transmitida (LUBRIN).

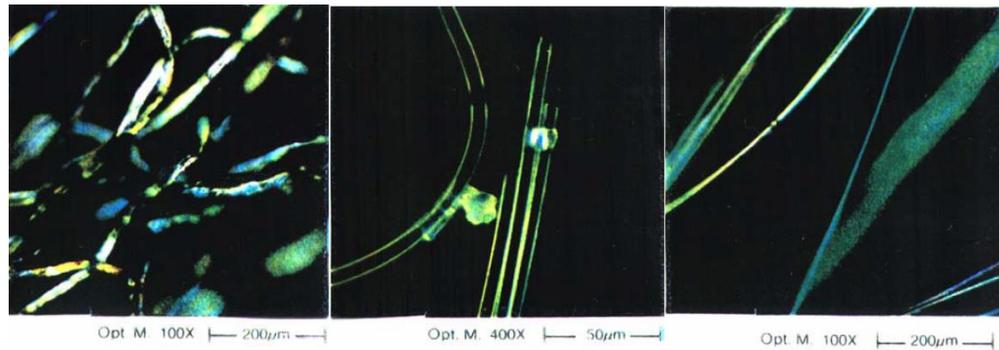


Figura 2.26 - À esquerda, fibra de celulose; ao centro, fibras de vidro; à direita, fibra de poliéster. (modificada de LUBRIN).

2.6 Amostragem

A ferrografia se inicia com a coleta de uma boa amostra, que pode ser considerada o ponto crítico desta técnica. Essa amostra deve representar, de forma fidedigna, o óleo presente no motor. Apenas assim, os resultados obtidos por essa técnica, e as análises subsequentes, poderão ser confiáveis. Dessa forma, é necessário tomar alguns cuidados ao se fazer esse procedimento de amostragem. O primeiro deles, de fundamental importância, é a escolha do local e o momento mais adequado para se fazer a amostragem. Além disso, um padrão para a coleta das amostras deve ser pré-definido. Caso esses cuidados não sejam tomados, a quantidade e as dimensões das partículas, na amostra, podem variar significativamente, o que acarretaria análises falsas do estado do motor (LUBRIN).

Para escolha do momento mais adequado para se fazer a amostragem, deve-se ter em conta o tempo necessário para a quantidade de partículas presentes no óleo atingir o equilíbrio, ou seja, a quantidade de partículas geradas se tornar igual à quantidade de partículas perdidas. Para isso, existem modelos matemáticos cujo objetivo é avaliar quando e como esse equilíbrio é atingido. Alguns desses modelos chegaram à conclusão de que a concentração final de partículas é inversamente proporcional à taxa de remoção delas. Essa remoção pode ocorrer por diversos mecanismos, como filtração, decantação, adesão às superfícies sólidas, trituração, dissolução e separação magnética. Além disso, esses modelos indicarão por quanto tempo uma máquina deve funcionar para que seja feita uma amostra representativa de óleo (LUBRIN).

Todo filtro apresenta, quantificada pela eficiência de filtragem, certa capacidade de reter partículas. Quando essa eficiência é grande, ocorre um aumento da quantidade de partículas de desgaste retidas no elemento filtrante, o que provoca uma redução na concentração de partículas misturadas ao óleo e redução no tempo necessário para chegar ao equilíbrio dinâmico. Dessa forma, pode-se afirmar que a condição de equilíbrio é uma função da taxa de geração de partículas de desgaste, da vazão volumétrica do óleo e da eficiência do filtro (JOHNSON; HUBERT, 1982).

A Figura 2.27 ilustra o comportamento da concentração de partículas com o tempo. Pode-se observar um aumento na concentração durante a fase inicial, decorrente do processo de acomodação ou amaciamento das peças. Durante a fase de desgaste normal, observa-se o estabelecimento do equilíbrio dinâmico da concentração. Já na fase de desgaste anormal, pode-se verificar um aumento exponencial da concentração. Este fato é utilizado como proposição elementar da monitoração de máquinas através de análise de partículas de desgaste, ou seja, um desgaste anormal de uma peça é responsável por aumentar a concentração e as dimensões das partículas acima de um padrão considerado como normal (LUBRIN).

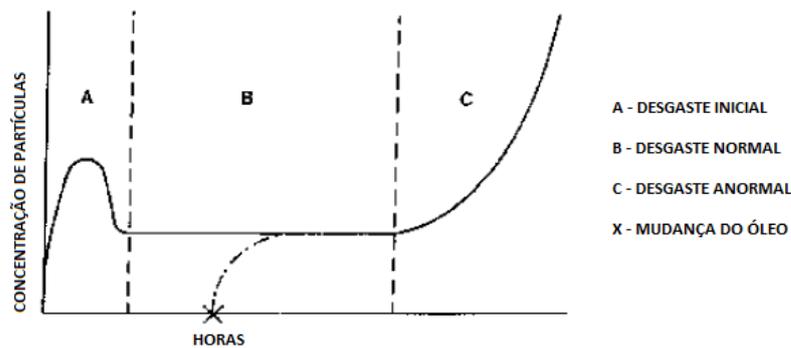


Figura 2.27 - Variação da concentração de partículas ao longo do tempo. (Modificada de LUBRIN).

2.6.1 Técnicas de Amostragem

Como visto acima, tanto a geração de partículas como a capacidade de remoção dessas partículas dos óleos lubrificantes, influenciam no equilíbrio final de partículas no óleo. Em função disso, algumas considerações devem ser feitas sobre a amostragem. A primeira é que a quantidade de partículas, no óleo, pode ser bastante diferente, dependendo do modo de operação ao qual o motor está sujeito. Dessa forma, é importante conhecer a condição de

operação deste motor para que uma amostra representativa seja coletada com ele em funcionamento (LUBRIN).

A amostra também pode ser coletada após a parada da máquina. Nesse caso, deve-se levar em consideração a decantação das partículas misturadas ao óleo. Desse modo, é aconselhável coletar a amostra no instante posterior à parada da máquina, ou, caso não seja possível, até no máximo duas horas. Além disso, para que a análise ferrográfica desse motor possa ser feita da forma mais realista possível, é necessário que as amostras subsequentes sejam coletadas de acordo com a primeira, ou seja, utilizando, para todas as amostras, o mesmo período, após parada do motor, para fazer a coleta (LUBRIN).

Outro fator que deve ser considerado é a troca do óleo. Nota-se, na Figura 2.27, que, quando o óleo é trocado, existe um certo tempo para se alcançar o equilíbrio novamente. Então, a amostragem deve ser feita somente após esse intervalo de tempo (LUBRIN).

Outra consideração importante é que todas as amostras devem ser coletadas no mesmo ponto do motor, uma vez que a concentração de partículas pode variar de um local para outro, por exemplo, antes e depois do filtro. A distribuição de partículas de desgaste pode ser influenciada de duas formas pelo filtro. Uma delas é reduzindo a concentração de partículas no óleo, que é a própria função do filtro. A segunda é que as partículas maiores têm mais facilidade de serem retidas no filtro do que as partículas menores. Dessa maneira, a concentração de partículas grandes, misturadas ao óleo, diminuirá. Isso pode ocasionar um retardamento na detecção do início de um desgaste severo, se a amostra for coletada a jusante do filtro. Caso a amostra seja coletada a montante do filtro, a observação de partículas grandes, no ferrograma, é um indício de que um desgaste severo pode estar ocorrendo (LUBRIN).

2.6.2 Amostragem pela Tubulação

A melhor forma de se obter uma amostra de óleo representativa, que indique o real estado do motor, é fazendo a coleta na rede de retorno do óleo, a montante do filtro, e esse óleo deve ter lubrificado todas as peças dessa máquina. Uma consideração importante deve ser feita quando a coleta é realizada com o auxílio de uma válvula, uma vez que este

elemento é uma fonte tanto de deposição de partículas provenientes do sistema como de geração de novas partículas a partir dela mesma, nos processos de abertura e fechamento. Para contornar esses problemas, é necessário realizar o “*flushing*” da válvula antes de coletar a amostra (LUBRIN).

2.6.3 Amostragem pelo Reservatório de Óleo

Caso não seja possível fazer a amostragem com a máquina em funcionamento, deve-se fazê-la diretamente do reservatório de óleo. Porém, esse procedimento apresenta dois problemas. O primeiro ocorre quando a amostra é coletada da parte inferior do cárter. Nesse caso, existe grande chance de que a amostra apresente uma elevada concentração de partículas, consequência do processo de decantação. O segundo problema ocorre quando a coleta é realizada na parte superior do cárter, depois que o motor parou. Nessa circunstância, pode-se colher uma amostra com concentração de partículas bastante reduzida, fato que também se deve à decantação (LUBRIN).

Os dois problemas apresentados acima podem fornecer uma amostra pouco representativa da real situação do motor. Uma concentração de partículas acima do real fornecerá um indício falso de desgaste, o que influenciará na tomada de decisão sobre a manutenção, fazendo com que a peça seja trocada ou reparada antes do instante realmente necessário, acarretando custos desnecessários de material e parada do motor. No outro caso, quando a amostra possui uma concentração abaixo do real, que é o pior caso, pode mascarar um problema grave que esteja ocorrendo em determinada peça, podendo levar à sua falha funcional e, conseqüentemente, à falha do motor.

2.6.4 Frequência de Amostragem

Outra variável importante, no processo de amostragem, é a frequência de amostragem, ou intervalo de tempo entre duas amostragens consecutivas. Alguns fatores devem ser levados em conta para se obter uma frequência de amostragem adequada. O primeiro deles é o intervalo de tempo decorrente entre o desgaste normal e o severo. Quando o motor apresenta uma velocidade de deterioração elevada, esse tempo entre o desgaste normal e o severo é reduzido, sendo necessária, dessa forma, uma frequência de amostragem

alta, de tal forma que seja reduzida a chance de que a análise ferrográfica não consiga detectar quando o desgaste da peça passa de normal para severo (LUBRIN).

O regime de operação, ao qual o motor está sujeito, também interfere na determinação da frequência de amostragem, pois se sabe que diversas falhas de peças são decorrentes da utilização da máquina em situações de velocidades acima do especificado, sobrecarga, choques, vibrações etc. Essas formas de utilização acarretam desgaste excessivo do motor, sendo necessária, por esse motivo, uma maior frequência de amostragem (LUBRIN).

2.6.5 Concentração de Partículas na Amostra

A concentração de partículas de desgaste, nas amostras colhidas, durante a operação de um motor diesel, pode variar bastante. Quando essas concentrações são muito baixas, é necessário utilizar altos volumes de óleo, cerca de 24 ml, que passará por cima da lâmina do ferrógrafo analítico, para que se possa obter uma resolução aceitável dessas concentrações. Já nas situações em que essas concentrações são muito elevadas, mesmo pequenos volumes, menos que 3 ml de óleo, escorrendo sobre a lâmina, provocam leituras distorcidas de densidade devido à sobreposição de partículas de desgaste à medida que são depositadas na lâmina de vidro. Nesta situação, é necessário diluir a amostra de óleo com óleo limpo para reduzir o número de partículas que se sobrepõem (JOHNSON; HUBERT, 1982).

Existe uma relação linear entre a densidade de depósito de partículas nas lâminas do ferrógrafo e o volume de óleo que passa por essas lâminas. Essa densidade de depósito, que corresponde à concentração de partículas, quantificada pela área da lâmina coberta por partículas, deve ser normalizada para uma amostra de 1 ml de óleo. Dessa forma, ficou padronizado que as leituras de concentração de ferrografia devem ser expressas em unidades de porcentagem por mililitro de óleo que atravessa a lâmina (JOHNSON; HUBERT, 1982).

Esse procedimento apresenta um problema, uma vez que foi observado que os dados não mostram um valor de densidade zero quando um volume de óleo zero é passado pela lâmina. Na Figura 2.23, pode-se notar que, se a interceptação no ponto de abscissa zero (zero, $b = 3\%$) é ignorada, uma inclinação diferente é obtida. Desse modo, gera-se um erro

quando não se leva em consideração essa concentração para volume zero. A concentração real leva em consideração essa interceptação e é definido como $(A - b) / V$, enquanto a concentração calculada ignora a interceptação e é definido como A / V , em que A é a área percentual coberta, b é a porcentagem para volume zero de óleo e V é o volume de óleo da amostra. O erro é a diferença entre as inclinações das linhas que representam as concentrações (JOHNSON; HUBERT, 1982).

Pode-se visualizar, na Figura 2.28, que, quando o volume de óleo da amostra ou a concentração de partículas é aumentada, o erro diminui, uma vez que a concentração calculada chega mais perto da concentração real. Isso, também, pode ser observado na Figura 2.29 (imagem da esquerda), em que o erro percentual de concentração, em consequência do procedimento de cálculo, é mostrado como uma função do volume de óleo da amostra para várias concentrações diferentes. Também, pode-se observar, nessa mesma imagem, uma região hachurada (área coberta superior a 30%), que corresponde a uma região não operacional em função da ocorrência de um erro adicional graças à sobreposição de partículas. À vista disso, pode-se afirmar que o máximo de área coberta, que é possível analisar em um ferrograma, é de 30%. O erro na concentração é também afetado pela magnitude da área percentual coberta de interceptação (valor de b no volume zero). O erro é uma função da interceptação, bem como da área percentual coberta, conforme mostrado na Figura 2.29 (imagem à direita) (JOHNSON; HUBERT, 1982).

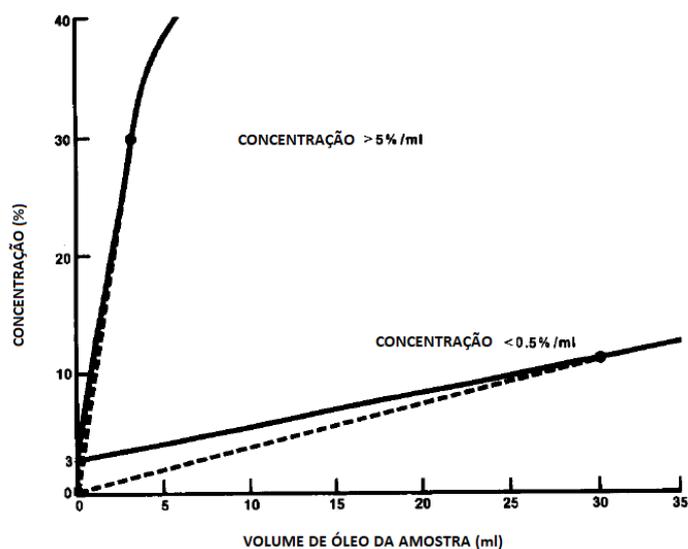


Figura 2.28 - Diagrama esquemático mostrando a diferença, para duas concentrações diferentes, nas inclinações entre a concentração real para $b = 3\%$ e a curva teórica (---). (Modificada de Johnson e Hubert, 1982).

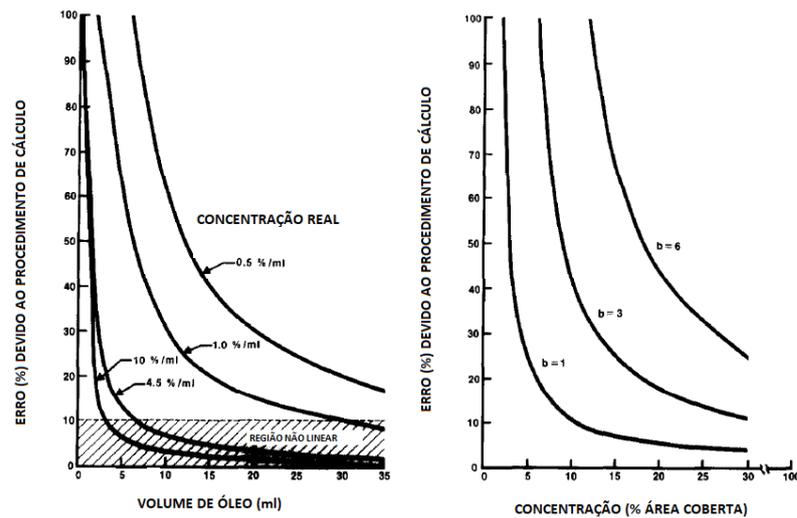


Figura 2.29 - Erro na concentração em função do procedimento de cálculo devido à concentração b . A imagem, à esquerda, relaciona o volume de óleo com o erro para várias concentrações normalizadas e a imagem, à direita, relaciona a concentração com o erro para vários valores de b . (Modificada de Johnson e Hubert, 1982).

JOHNSON e HUBERT (1982) fizeram alguns experimentos para avaliar a influência do intercepto b sobre a concentração de partículas de desgaste lida em um ferrograma. Pelos seus estudos, concluíram que utilizar um valor de $b = 3\%$ corresponde a uma boa aproximação, aliando praticidade (fazer os cálculos com um valor de b constante) com boa concordância com os dados reais.

2.7 Manutenção Preditiva por Ferrografia

Como comentado anteriormente, a ferrografia pode ser utilizada como técnica de manutenção preditiva. Para isso, é necessário que seja estabelecido um procedimento de coleta regular de dados, realizado por meio de amostragens do óleo lubrificante da máquina e subsequente construção e análise dos ferrogramas.

De acordo com YAN e XIAO (1995), esse tipo de manutenção inclui três fases, que são: identificação da falha em desenvolvimento no estágio inicial; diagnóstico de sua origem para que seja possível prover as peças de reposição; e medições subsequentes, que estabelecerão a tendência e permitirão o planejamento da data de reparo. Para que isso seja viável, é fundamental ter conhecimento das condições da máquina e de sua taxa de alteração com o tempo.

Basicamente, a técnica consiste na plotagem do parâmetro em estudo, como a concentração total de partículas ($L + S$), em função do tempo de utilização do equipamento. Também, é necessário estabelecer um nível limite de desgaste, caracterizado por um valor específico de concentração de partículas, considerado, pelos analistas, como inaceitável, e que corresponde à falha catastrófica. Então, analisando-se a curva, é possível identificar o instante em que o comportamento dela começa a mudar, caracterizando uma falha potencial. Por meio de extrapolação gráfica até o nível limite, pode-se prever o instante da falha catastrófica. Um exemplo desse tipo de curva é o gráfico de tendências, mostrado na Figura 2.4.

A Figura 2.30 ilustra o período de aplicação da manutenção preditiva. A imagem, à esquerda, evidencia a curva da “banheira”, onde está representada a taxa de avarias em função do tempo. Podem-se analisar três períodos distintos nessa curva. O período de mortalidade infantil, que se inicia com uma taxa de desgaste elevado, devido ao processo de amaciamento sofrido pelas peças, reduzindo com o passar do tempo. O período II, chamado de vida útil, é quando a máquina produz uma quantidade constante de partículas de desgaste, representando um desgaste normal. Já o terceiro período, de desgaste efetivo, é caracterizado por um aumento acentuado na produção de partículas.

Na imagem, à direita, da Figura 2.30, pode-se observar o período efetivo de manutenção preditiva (PDM), que é o intervalo de tempo compreendido entre o final do período II, onde foi detectada a falha potencial (P), e a falha funcional (F). Importante salientar que se deve fazer amostragens do óleo durante os três períodos, mas, apenas no PDM, é que serão tomadas as decisões sobre a tarefa de manutenção mais adequada. Nessa imagem, F_i representa o início da falha e P_1 , P_2 e P_3 são pontos de amostragens (CAMPOS, 2011).

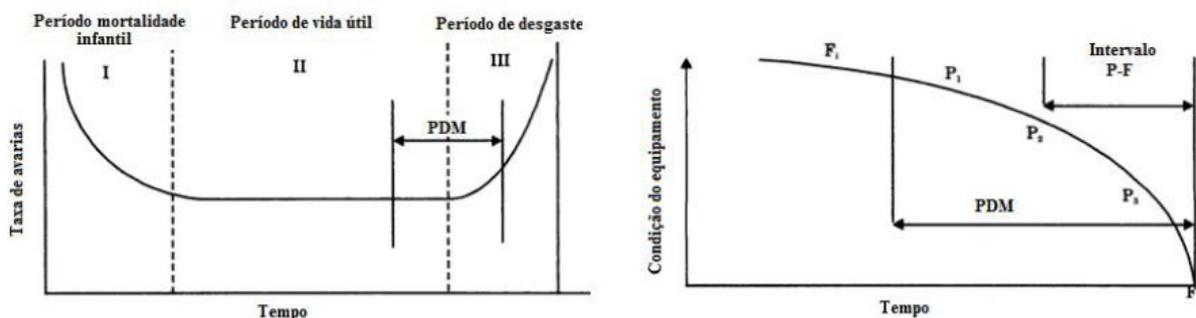


Figura 2.30 – Curva da “banheira” (imagem à esquerda); Curva de falha potencial (imagem à direita). (CAMPOS, 2011).

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica de livros, artigos, teses e dissertações retirados do portal Periódicos CAPES, sites da internet e bibliotecas. Além disso, foram analisados manuais técnicos de motores diesel de navio da MB. Essa seção do trabalho teve como objetivo criar uma base sólida de conhecimento acerca do assunto, aqui, tratado. A natureza dessa pesquisa é, essencialmente, qualitativa. Em seguida, foram realizados estudos de casos reais, tendo como base alguns artigos científicos.

4. DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para o desenvolvimento desse trabalho, foi realizada uma visita à Diretoria de Engenharia Naval (DEN). Por ocasião dessa visita, foram encontrados alguns problemas para adquirir o material necessário para realizar um estudo de caso. Primeiramente, a DEN informou que a Marinha não realiza análise ferrográfica e, nos raros casos em que é feita, são contratadas empresas especializadas. Outro problema encontrado foi a questão do sigilo das informações, não sendo possível ter acesso a certos materiais, uma vez que alguns deles poderiam trazer informações sobre a atual situação operacional de determinados meios navais.

4.1 Análises de Casos Reais

A seguir, serão tecidos alguns comentários em torno dos estudos de análises ferrográficas quantitativa e analítica, feitos em motores diesel, encontrados em artigos científicos. Vale frisar, aqui, a correspondência direta entre a concentração de partículas de desgaste e a porcentagem de área do ferrograma coberta pelas partículas.

4.1.1 Análise por Ferrografia Quantitativa de Motores Diesel

4.1.1.1 *Motor Diesel V8 de 134 KW*

JONES (1979) salienta os resultados para uma análise quantitativa, realizada em um motor diesel V8 de 134 KW, durante um período de amaciamento. A Figura 4.1 representa a porcentagem de área do ferrograma coberta por partículas de desgaste, em função da posição dessas partículas no ferrograma, para dois tipos de partículas, as originadas de peças de ferro fundido e as formadas a partir de componentes de aço. Foram realizadas duas amostragens do óleo lubrificante, com intervalo de tempo de cerca de três horas entre elas, uma com 1h 12min de funcionamento do motor e outra com 4h 6min. A Figura 4.2 expõe a relação entre a porcentagem de área coberta e o tempo de funcionamento do motor para esses dois tipos de partículas.

Pode-se observar, na Figura 4.1, que, para as partículas de ferro fundido, as concentrações de partículas de desgaste, em todas as posições padronizadas do ferrograma, 50 mm, 40 mm, 30 mm etc, diminuíram entre a primeira e a segunda amostragem. Analisa-se uma maior redução nas partículas maiores, fato verificado pela diminuição da porcentagem de área coberta na posição de 50 mm. Essa redução pode ser explicada em função de uma estabilização na produção das partículas de desgaste. Assim sendo, a filtragem do óleo foi a responsável por diminuir a quantidade desses detritos. Essa teoria é reforçada, uma vez que o filtro tem uma maior eficiência de filtragem para partículas maiores, então, espera-se que haja uma maior redução na quantidade dessas partículas em detrimento das partículas menores, que foi exatamente o observado.

Ainda analisando a Figura 4.1, pode-se notar um aumento na concentração de partículas grandes. Já a concentração de partículas menores permaneceu, praticamente, constante.

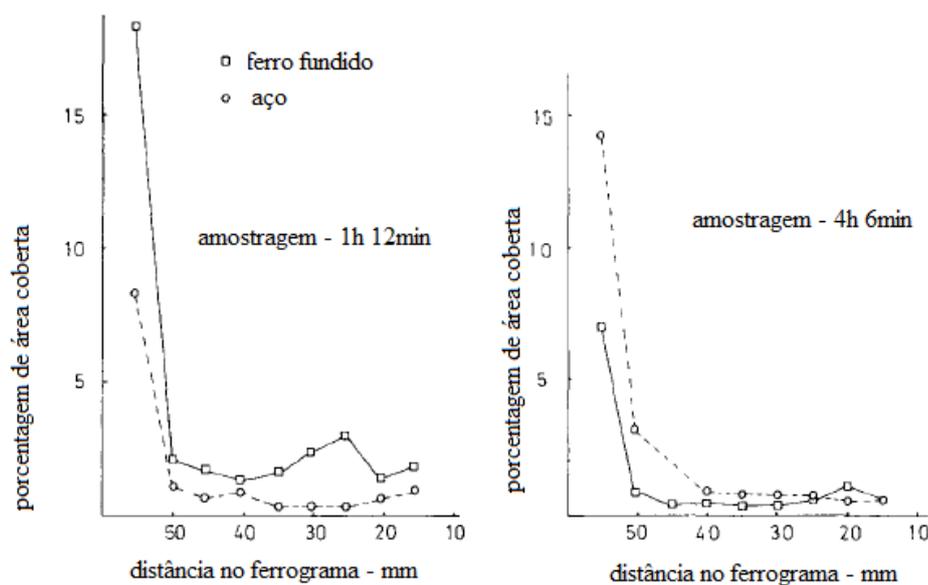


Figura 4.1 - Porcentagem de área coberta no ferrograma por distância no ferrograma para partículas de ferro fundido e partículas de aço, em amostragens realizadas com 3 horas de diferença. (Modificada de JONES, 1979).

Analisando-se a Figura 4.2, pode-se verificar que a concentração de detritos de aço permanece praticamente constante durante o período de amaciamento de 6 h. Dessa forma, percebe-se que o aumento, na concentração de partículas grandes, observado na Figura 4.1, não foi significativo. Entretanto, a concentração de partículas de desgaste de ferro fundido, reduziu de uma cobertura de área de 15% para uma cobertura de área de 5% no final

do período de teste. As partículas de aço são originadas, provavelmente, do virabrequim, enquanto as partículas de ferro fundido são produzidas a partir do revestimento do cilindro (JONES, 1979).

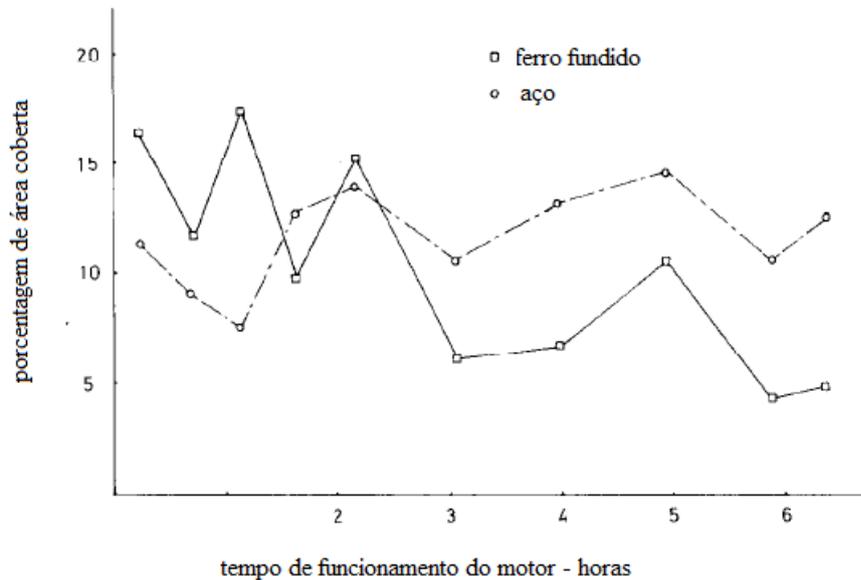


Figura 4.2 - Porcentagem de área coberta em função do tempo de funcionamento do motor para partículas de aço e partículas de ferro fundido. (Modificada de JONES, 1979).

4.1.1.2 Motor Diesel 6 cilindros de 110 KW

YAN (1995) fez um estudo sobre ferrografia quantitativa para dois motores, o de bombordo e o de boreste, de um rebocador. Esses motores, quatro tempos, modelo 6135ACaB, possuem seis cilindros, potência 110 KW e 1500 rpm de rotação máxima. Ele monitorou essas máquinas por um período superior a 2000 horas de funcionamento. As amostras de óleo eram, geralmente, retiradas de uma válvula montada na rede de óleo lubrificante a montante do filtro de óleo.

A Figura 4.3 expõe os gráficos de tendência, nos quais são mostrados os resultados obtidos para esses dois motores. Nela, a porcentagem de área do ferrograma coberto por partículas de desgaste está em função do tempo de funcionamento para cada máquina. Essa porcentagem já considera a soma das áreas coberta por partículas grandes (L) e pequenas (S). No motor de bombordo, pode-se observar que existem três picos de concentrações, A, B e C, a cerca de 250, 1100 e 1500 horas, respectivamente. Esses picos

podem ser um indício de desgaste anormal de alguns componentes. A redução, na concentração observada, após o pico, pode ser explicada pela substituição do filtro ou pela troca do óleo.

Já para o motor de boreste, observa-se, na Figura 4.3, que existem dois picos de concentrações de partículas de desgaste. É possível verificar, também, que as concentrações de partículas, nesse motor, são maiores que as do motor de bombordo, o que, provavelmente, é resultado de um desgaste mais severo daquele motor. Interessante comentar, também, que, diferentemente dos outros picos de concentração, tanto do motor de bombordo como do motor de boreste, após o pico B do motor de boreste, não ocorre uma redução significativa da concentração, o que, possivelmente, significa que o grau de severidade aumentou e, mesmo a troca de filtro e óleo, não foi o suficiente para reduzir a concentração.

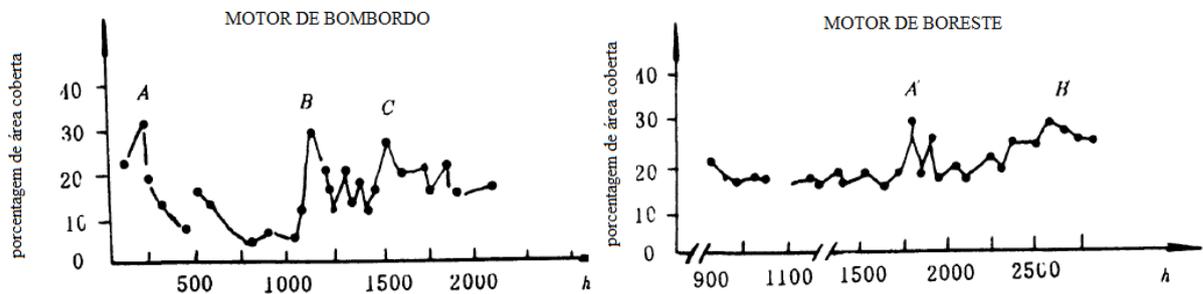


Figura 4.3 - Porcentagem de área coberta em função do tempo de utilização para os motores de bombordo e boreste. (Modificada de YAN, 1995).

4.1.2 Análise, por Ferrografia Analítica, de seis Motores Diesel

ISA (2013) faz um estudo de ferrografia analítica de seis motores diesel. Os resultados são mostrados nas Figuras 4.4 e 4.5. Na Figura 4.4, estão expostas as imagens a, b e c, representando, respectivamente, os motores 1, 2 e 3. Já na Figura 4.5, estão ilustradas as imagens correspondentes aos motores 4, 5 e 6, representadas, respectivamente, por a, b e c. O artigo não citou as especificações técnicas desses motores.

Para os motores 1, 2 e 3, a análise ferrográfica revelou que a maior parte das partículas de desgaste era originada de desgaste normal, com dimensão inferior a $15\ \mu\text{m}$ para os motores 1 e 3 e menos de $10\ \mu\text{m}$ para o motor 2. As partículas de desgaste por atrito normal foram produzidas devido ao desgaste normal que ocorre em virtude do deslizamento

de peças em contato direto. As partículas de desgaste por fricção consistiam em plaquetas planas, normalmente de 5 μm ou menores, embora elas atinjam até 15 μm , dependendo da aplicação do regime de operação da máquina. A espessura aproximada dessas partículas é de 1 μm ou menos (ISA, 2013).

Outras informações importantes, contidas na Figura 4.4, devem ser tecidas. Pode-se perceber a presença de uma partícula relativamente grande, com cerca de 20 μm , na parte superior central da imagem a. Devido à sua coloração esbranquiçada, ela corresponde a uma partícula de cromo ou alumínio. Também, pode-se constatar, na parte inferior central da imagem b, uma partícula escura, com cerca de 20 μm , que pode ser um indício de uma leve oxidação, provavelmente, originada durante a partida do motor, quando as peças entram em contato direto, uma vez que o filme de lubrificante ainda não foi completamente formado.

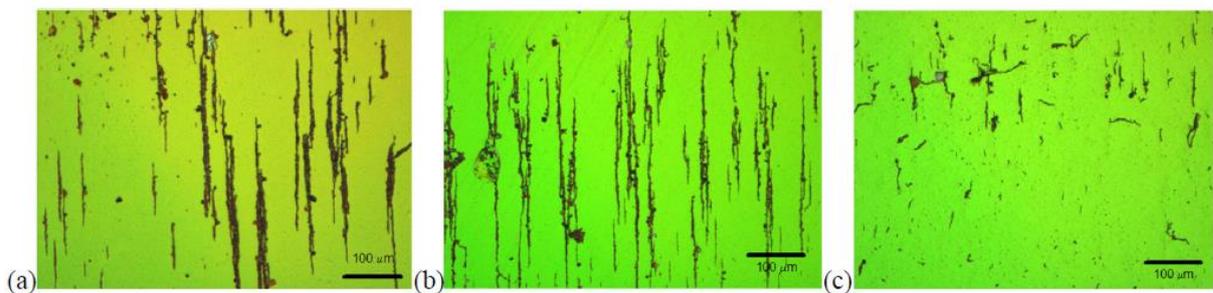


Figura 4.4 - Imagens de ferrogramas das amostras de óleo lubrificante dos motores 1 (a), 2 (b) e 3 (c). (ISA, 2013).

Na análise ferrográfica, ilustrada na Figura 4.5, é possível considerar que a maioria das partículas de desgaste oriundas dos motores 4 e 5 também era originada de desgaste normal, com dimensão inferior a 15 μm . Para o motor 6, pode-se observar a presença de partículas de desgaste com tamanhos superiores a 50 μm , tendo sido originadas, provavelmente, graças ao desgaste por fadiga. A imagem c ilustra uma elevada quantidade de partículas de desgaste anormais, evidenciando um desgaste severo. Prova disso, é que as linhas de fluxo magnético são empilhadas umas sobre as outras e são, individualmente, indistinguíveis, ilustrando a alta concentração de partículas. Isso é um indício de que um problema sério pode ter ocorrido. Comparando-se os resultados com os motores 4 e 5, onde não foram detectadas partículas de desgaste anormais, foi confirmado que esta unidade estava passando por um modo de desgaste anormal, com risco, iminente, de uma falha catastrófica (ISA, 2013).

Pode-se constatar, na imagem a da Figura 4.5, a presença de uma partícula escura grande, com cerca de 50 μm , que pode ter sido originada de um processo oxidativo decorrente de baixa lubrificação. Nesse caso, evidencia-se um desgaste um pouco mais severo que o ocorrido no motor 2, tendo em vista a diferença de tamanhos entre as partículas.

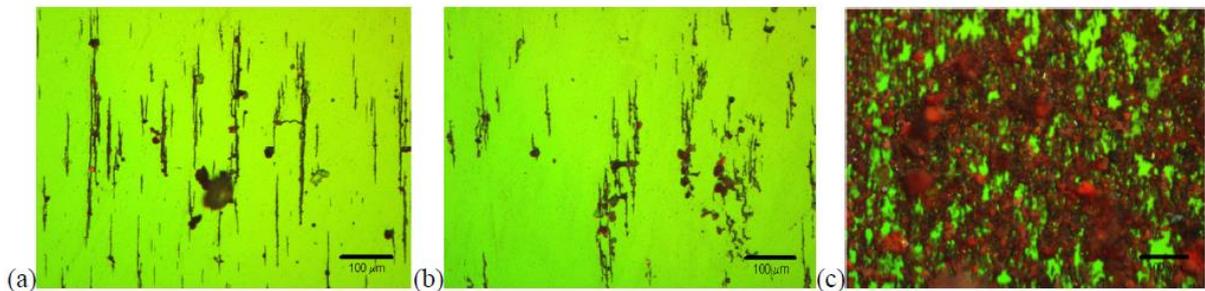


Figura 4.5 - Imagens de ferrogramas das amostras de óleo lubrificante dos motores 4 (a), 5 (b) e 6 (c). (ISA, 2013).

4.2 Considerações sobre a Utilização da Ferrografia na Marinha do Brasil

Como comentado acima, a Marinha do Brasil não realiza análises ferrográficas, e, nos casos em que são contratadas empresas para efetuar essas análises, os resultados são utilizados apenas para verificar o estado atual do equipamento. Essas análises não são utilizadas como uma forma de manutenção preditiva. Por ocasião da visita à DEN, o engenheiro responsável pela divisão de materiais desta Organização Militar, informou que, no passado, na década de 90, a Marinha possuía projetos para realizar manutenção preditiva dos motores de alguns navios utilizando a ferrografia, porém, esses projetos foram abandonados.

Em parte, a pouca utilização da ferrografia se deve ao desconhecimento, por parte das autoridades competentes nas tomadas de decisões, do potencial de detecção, da análise e predição de falhas desta técnica. Outro fator de expressiva contribuição para a não adoção dessa técnica, são os custos envolvidos para que sejam feitas as coletas das amostras e, principalmente, as análises subsequentes dessas amostras.

É inviável, por questões financeiras, utilizar esse método em todos os navios da Marinha brasileira. Porém, seria de grande valia usá-la nos motores de alguns meios

considerados essenciais, como o Porta-Helicópteros Multipropósito Atlântico, as fragatas que participam da missão Líbano e o Navio Escola Brasil.

A ferrografia pode ser utilizada, nesses meios, para se obter uma análise do estado instantâneo do motor. Porém, mais importante ainda, é estabelecer um procedimento para coletar amostras com períodos pré-determinados, de forma que seja possível realizar uma manutenção preditiva. Assim sendo, seria possível acompanhar a evolução do desgaste, identificando o instante de ocorrência de uma falha potencial e, por extrapolação, predizer o instante da falha funcional.

Caso isso seja posto em prática, esses meios poderão fazer uma manutenção com custos mais reduzidos, uma vez que não serão trocadas peças que ainda estejam em plenas condições de uso, como ocorre na manutenção preventiva. Além disso, o estado do motor será sempre conhecido, diminuindo, assim, a probabilidade de ocorrer uma falha catastrófica em um equipamento, o que poderia prejudicar outras peças da máquina.

5. CONCLUSÃO

Foi feito, nesse trabalho, uma revisão bibliográfica em torno dos principais aspectos relacionados à ferrografia, tanto quantitativa como analítica. A pesquisa abrangeu os principais tipos de partículas de desgaste encontradas em amostras de óleo lubrificante, como elas são geradas e quais as técnicas mais utilizadas para evitar o desgaste. Além disso, foi feito um estudo sobre diversos outros temas, como manutenção preditiva, principais componentes de um sistema de lubrificação de um motor diesel e alguns aspectos acerca da tribologia. Foi dada uma maior ênfase às partículas geradas devido ao desgaste das peças, uma vez que a técnica da ferrografia se baseia, essencialmente, na identificação, classificação e análise dessas partículas.

Também foi feito um estudo sobre os aspectos que envolvem os procedimentos de amostragem. Cabe ressaltar, aqui, a importância que essa etapa desempenha na técnica da ferrografia, pois, apenas com uma amostra que represente, fielmente, o estado atual do motor, será possível analisar o real nível de desgaste das peças dessa máquina. Um comentário adicional deve ser feito, uma vez que não foi observado nas referências. No referencial teórico, foi afirmado que as amostras coletadas, antes e após o filtro de óleo, podem apresentar significativas diferenças de concentrações, principalmente de partículas maiores. Então, o sugerido por esse trabalho seria que fossem coletadas duas amostras, uma, a montante do filtro, fornecendo informações sobre as partículas maiores, e outra, a jusante do filtro, focando nas partículas menores. Isso poderia resultar em uma análise mais completa do estado de desgaste do motor. O ponto negativo desse procedimento, em especial, é a elevação nos gastos necessários para realizar as amostras, uma vez que seria necessário analisar duas amostras e não apenas uma.

Nos estudos realizados sobre casos reais feitos por este trabalho foi possível verificar na prática alguns conceitos observados na teoria, como as concentrações de partículas grandes (L) e pequenas (S), necessárias para a elaboração do gráfico de tendências. Além disso, foi feito um estudo sobre ferrografia analítica aplicada a um motor diesel, onde foi possível verificar o nível de desgaste da máquina, analisando-se o tamanho, tipo e quantidade de partículas presentes nas imagens obtidas a partir do ferrograma.

O ponto chave deste trabalho é mostrar, para pessoas ligadas à Marinha, os benefícios da técnica da ferrografia, que pode ser usada tanto como uma forma de analisar a situação instantânea do estado de um motor, como também como uma ferramenta para a elaboração de um plano de manutenção preditiva para os meios navais.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Os próximos trabalhos poderiam fazer uma análise ferrográfica de um motor de algum navio da Marinha do Brasil com o intuito de elaborar uma manutenção preditiva. Para isso, seria necessário monitorar periodicamente esse motor, fazendo análises de amostras de óleo lubrificante em intervalos de tempo pré-estabelecidos.

REFERÊNCIAS

BRUNETI, Franco. **Motores de combustão interna, volume 2**. 2ª reimpressão. São Paulo, 2012.

CAMPOS, Diogo Carlos Melo de Pinho. **Implementação de técnicas e ferramentas para manutenção preditiva na Colep**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.

CUNHA, Rodrigo Carvalho. **Análise do estado de conservação de um redutor de velocidade através da técnica de partículas de desgaste no óleo lubrificante auxiliada pela análise de vibrações**. Ilha Solteira, 2005.

JOHNSON, John H.; HUBERT, Christopher J. **An overview of recent advances in quantitative ferrography as applied to diesel engines**. Houghton, 1992.

JUNIOR, Araci Araujo dos Santos. **Determinação de parâmetros de óleos lubrificantes de motores de ciclo Otto e ciclo Diesel através da espectroscopia no infravermelho, métodos multivariados e catas de controle**. Brasília, 2011.

LAGO, Daniel Fabiano. GONÇALVES, Aparecido Carlos. **Manutenção preditiva de um redutor usando análise de vibrações e de partículas de desgaste**. 16º POSMEC. FEMEC/UFU, Uberlândia-MG, 2006.

LAGO, Daniel Fabiano. **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**. Ilha Solteira, 2007.

LUBRIN. **Apostila de ferrografia**. São Paulo, 2010?.

MACIÁN, V. et al. **Applying analytical ferrography as a technique to detect failures in Diesel engine fuel injection systems**. Universidade Politécnica de Valência, Valência, Espanha, 2005.

JONES, M. H. **Ferrography applied to diesel engine oil analysis**. Department of Mechanical Engineering, University College of Swansea, Grã-Bretanha, 1979.

ISA, M. C. et al. **Ferrographic analysis of wear particles of various machinery systems of a comercial marine ship**. A Maritime Technology Division, Science & echnology Research Institute for Defence (STRIDE), Perak, Malásia, 2013.

STOETERAU, R. L. **Apostila de Tribologia**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2004.

TOMANIK, E. **Modelamento do Desgaste por Deslizamento em Anéis de Pistão de Motores de Combustão Interna**. Dissertação de Doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

WHITE, Frank M. **Mecânica dos Fluidos**. 6ª edição. AMGC editora ltda. New York, 2007.

YAN X. P., XIAO H.L. **Discussion on ship machinery maintenance based on oil monitoring**. Department of Marine Mechanical Engineering, Wuhan Transportation University, Wuhan, China, 1995.