

FERROGRAFIA -

Uma nova tecnologia para Monitoração de Desgaste

NIKOLAI YARON

Foxboro Brasileira Instrumentação Ltda.
Rua Prof. Campos de Oliveira, 245 - SÃO PAULO-SP

R E S U M O

Os princípios e desenvolvimento da FERROGRAFIA, um método de análise de partículas para fluidos, especialmente análise de partículas de desgaste em óleos lubrificantes, serão aqui explicados.

Os três instrumentos que são comercialmente disponíveis serão descritos.

Uma breve revisão das partículas de desgaste, cujo conhecimento permite prever uma falha incipiente da máquina, será apresentada.

Aplicações típicas como por exemplo monitoração das condições de máquinas rotativas, rolamentos e motores de combustão interna e sistemas hidráulicos serão discutidas.

Serão mencionados os recentes avanços da FERROGRAFIA, o que permite a precipitação de partículas magneticamente fracas.

DESGASTE

1. Introdução

A rentabilidade do investimento em equipamentos de produção de bens de serviços depende do seu desempenho e de sua disponibilidade para produzir. As falhas imprevistas impedem o cumprimento de prazos, dificultam o planejamento e reduzem a rentabilidade. A ocorrência destas falhas pode ser detetada em sua fase inicial, oferecendo a oportunidade de se eliminar e prevenir danos graves que iriam provocar paradas muito demoradas e prejuízos de grande monta, com quebra de vários componentes da máquina. Grande parte das falhas, fraturas inclusive, é provocada por desgaste que cria pontos de intensificação de tensão, enfraquece as peças e desajusta os mecanismos, levando a vibrações, cargas parasitas, perda de circulação de lubrificantes e perda de potência. Um bom conhecimento sobre mecanismos de desgaste ajuda a combatê-lo. Este trabalho visa principalmente o estabelecimento de uma linguagem comum para troca de idéias a respeito de desgaste.

2. Classificação de Desgaste

O desgaste pode ser dividido em 4 grupos principais:

- 2.1. "Abrasivo", através da remoção de cavacos da superfície das peças por ação de partículas que agem como ferramentas cortantes.
- 2.2. "Adesivo", através da remoção de flocos e partículas da superfície por ação de deslissamento, rolamento e atrito.
- 2.3. "Corrosivo", através do desprendimento de compostos químicos formados na superfície por ação eletroquímica.
- 2.4. "Composto", formado por combinação de dois ou três tipos de desgaste indicado em itens anteriores, com presença de agravantes, como calor, vibração e outros.

Cada um dos tipos de desgaste produz partículas características que podem ser localizadas nos filtros, no fundo dos recipientes e carcaças e, quando pequenas, como suspensões nos fluidos de lubrificação, de refrigeração, de transmissão e outros. Uma análise espectrográfica permite analisar o material das partículas; uma análise microscópica a sua forma e uma análise radioscópica a sua procedência.

3. Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo depende das dimensões, forma, dureza e tipo de ação do abrasivo, e pode ser, basicamente, classificado conforme os seus efeitos:

- 3.1. Erosão - provocada por contato de partículas pequenas em movimento (pós, suspensões, colóides) com a superfície da peça. O cavaco não é visível e sua ação só é notada após algum tempo devido à perda de dimensões e aparência polida, ou sedosa.
- 3.2. Abrasão de baixa sollicitação - provocada por remoção de cavacos visíveis, sem fratura das partículas abrasivas.
 - 3.2.1. Por partículas não angulosas (ação mais suave) desprendendo-se do material da superfície mais por fadiga superficial do que por corte (vide § 4.1).
 - 3.2.2. Por partículas angulosas que, movimentando-se sob pressão sobre a peça, removem cavacos com facilidade.
- 3.3. Abrasão de alta sollicitação provocada por remoção de cavacos pelas pontas do abrasivo sendo esmagado contra a peça, o que transforma a partícula abrasiva em várias menores, de pontas múltiplas.

3.4. Goivagem - provocada por sulcamento da superfície por partículas de volume maior, que cortam e deslocam o material da peça.

3.5. Abrasão com deformação, provocada por impactos violentos, ou grande pressão do abrasivo volumoso sobre a peça.

Todos os tipos de desgaste abrasivo levam à perda de dimensões, além de formarem sulcos ou arranhões que podem dar início à fratura da peça.

4. Desgaste Adesivo

Esta denominação implica em "aderência", e deveria abranger apenas o desgaste provocado por arrancamento de partículas aderidas entre as peças em contato e as peças em movimento. A maior parte do desgaste adesivo é, realmente, provocada por este mecanismo. Os picos de rugosidade das peças perfuram ocasionalmente a camada lubrificante, atritam violentamente entre si e geram calor suficiente para provocar microsoldas que, arrancadas devido à continuação do movimento, destroem as superfícies. Existem porém outros mecanismos de remoção de partículas da superfície, relacionados com o descrito acima, quando, ao invés de aderência, há apenas deformação do pico, elástica ou plástica, que com sua repetição leva à fadiga superficial, semelhante ao que ocorre com desgaste por rolamento. Pode, também, haver cisalhamento das rugosidades, ou arrancamento do grão, e ainda outros tipos. Quando a ação é suave ela pode levar ao espelhamento da superfície.

Classificação de Desgaste Adesivo

- 4.1. Por microsoldas - através do calor gerado por atrito entre dois materiais diferentes, que formam liga mais dura e quebradiça do que os seus componentes.
- 4.2. Por arrancamento de grãos - por solicitação mecânica das saliências da superfície da contra-peça.
- 4.3. Por arrancamento de grãos - provocado por aderência por difusão.
- 4.4. Por desprendimento de compostos químicos - formados com influência do calor de atrito.
- 4.5. Por sulcamento - provocado pelas imperfeições da superfície da contra-peça.
- 4.6. Por fadiga superficial - por deformação repetida das saliências superficiais.
- 4.7. Por aderência devido à atração atômica (raro) nas peças com acabamento excessivamente perfeito, em materiais de estrutura atômica igual, ou semelhante.

Nota-se que a denominação atualmente usada neste grupo abrange tipos de desgaste que não são realmente provocados pela adesão, mas apenas por atrito.

5. Desgaste Corrosivo

Trata-se, aqui, de deterioração da superfície pelo desprendimento de produtos formados com o material base e o ambiente, através de ação de corrente elétrica formada pela peça e pelo material do ambiente, que possuem estruturas diferentes, ou pela corrente imposta, com vários tipos de agravantes, tais como diferença grande de potencial, de pH, movimentação do ambiente, mudanças do ambiente e outros, ou atenuantes, tais como passivação ou polarização. Para que ocorra a corrosão deve haver anodo (que é destruído) e catodo (que atrai os íons do anodo).

Classificação de Corrosão

Os tipos mais frequentes de corrosão são:

- 5.1. Uniforme - quando há deterioração de toda a superfície.

- 5.2. Alveolar - com formação de depressões localizadas. Neste caso, nota-se que nos meios em movimento a corrosão é menor. Aqui, há formação de anodos localizados na superfície da peça.
- 5.3. Intergranular - nos contornos dos grãos que se tornam anodos, com a parte central do grão formando catodo.
- 5.4. Em frestas - com formação de depósitos de eletrolito por ação capilar.
- 5.5. Seletiva - com desaparecimento de um dos elementos da liga.
- 5.6. Química - com remoção da superfície por metais líquidos, ou outro meio quente, com formação de ligas.

Há outras denominações que surgiram do agente desencadeador da corrosão, mas elas geralmente não mudam as características do produto de corrosão.

6. Desgaste Composto

Como o nome indica, trata-se de desgaste provocado por mais de um agente, podendo haver ação simultânea de dois ou mais, ou ainda ação consecutiva.

Caso típicos são:

- 6.1. Abrasão com corrosão - quando há abrasão no meio corrosivo, ou quando os produtos de corrosão agem como abrasivos.
- 6.2. Abrasão em alta temperatura
- 6.3. Abrasão com corrosão em alta temperatura
- 6.4. Corrosão em alta temperatura
- 6.5. Corrosão com erosão - quando há corrosão com remoção de produtos pelo meio ambiente em movimento.
- 6.6. Corrosão induzida mecanicamente como:
 - 6.6.1. Fadiga superficial - por rolamento de corpos sobre superfícies, como em rolamentos, ou redes sobre trilhos, ou ainda brinelamento repetitivo.
 - 6.6.2. Pitting - por ação simultânea de rolamento e arrastamento de superfícies, como em dentes de engrenagens.
 - 6.6.3. Cavitação - por ondas de choque provocadas por implosões de bolhas de gás em líquido.
 - 6.6.4. Fretagem - por oxidação de partículas extremamente pequenas desprendidas por vibração e atrito.
 - 6.6.5. Eletroerosão - por ação de arco elétrico.
 - 6.6.6. Corrosão sob tensão - por sollicitação mecânica no meio corrosivo.
- 6.7. Adesão com abrasão - quando produtos do desgaste adesivo agem como abrasivos.
- 6.8. Adesão em alta temperatura - quando é facilitada a formação de compostos químicos nas superfícies em atrito.
- 6.9. Adesão com fadiga superficial - enquadrada usualmente em desgaste adesivo (vide § 4.6).

Os leitores interessados em se aprofundar no assunto têm à sua disposição vários compêndios sobre Tribologia, Corrosão e Desgaste.

A FERROGRAFIA (1), uma técnica para separar partículas do fluido para exame microscópico e subsequente análise, foi originariamente desenvolvida para precipitar magneticamente partículas de desgaste ferrosas nos óleos lubrificantes, por isso o nome FERROGRAFIA.

A primeira aplicação foi para possibilitar a monitoração de motores de aeronaves militares, mas agora surgiram outras aplicações, incluindo a modificação do método para precipitar partículas não magnéticas tanto no óleo como em outros fluidos. Isto é de interesse para sistemas hidráulicos, onde as partículas de material não-magnético, como pedaços de material de selagem, encontrados no fluido hidráulico, podem indicar falha iminente da máquina. Recentes pesquisas sobre partículas encontradas no fluido sinovial, ou fluido lubrificante das articulações humanas, permitem uma nova compreensão das doenças de articulação, como por exemplo artrite degenerativa, oferecem a possibilidade de monitorar implantes de articulações, e podem resultar em avanços na bio-engenharia. Entretanto, a grande maioria dos equipamentos ferrográficos atualmente em operação é usada para monitorar os equipamentos rotativos lubrificadas à óleo.

Há três instrumentos disponíveis para análise ferrográfica.

O Ferrógrafo para Leitura Direta (DR) (4) fornece informações sobre a concentração e distribuição do tamanho das partículas de desgaste transportadas pelo lubrificante. O Ferrógrafo DR é usado para a monitoração de rotina de máquinas e para pesquisa de amostras, anteriormente à preparação de um ferrograma.

A mais recente adição à instrumentação ferrográfica é o Ferrógrafo "On-Line", que é uma unidade com um sensor leve e compacto montada diretamente no sistema de lubrificação. Uma unidade de controle e indicação é montada remotamente. O Ferrógrafo "On-Line" proporciona o mesmo tipo de informação que o Ferrógrafo DR, mas o faz em uma base contínua.

O Ferrógrafo Analítico, que é o predecessor de ambos os instrumentos quantitativos já mencionados, é usado para preparar um ferrograma, que é subsequentemente examinado usando-se um microscópio bicromático.

O FERROGRAMA ANALÍTICO

Um ferrograma (fig. 1) é preparado bombeando-se fluido através de um tubo de teflon (C), por meio de uma bomba peristáltica, para dentro de um substrato de vidro especialmente preparado (A), que tem uma proteção à prova d'água (B) pintada em uma das superfícies, para canalizar centralmente o líquido. O ferrograma é levemente inclinado, com o terminal de entrada elevado, para que o fluido escorra para baixo, da direção da barreira em terminal ovalado para um tubo de drenagem (E) que liberta o óleo para um recipiente de resíduos. O tubo de teflon é fixado no lugar por uma alça de descarga (F), e o ferrograma é fixado no lugar por um pino com mola (G). O ferrograma é montado sobre dois ímãs permanentes (H) e (I), que são separados por uma folha de alumínio de cerca de 1/16" de espessura. O ferrograma é posicionado de tal modo que a placa de alumínio separadora (J) fique sob o meio do canal de escoamento do ferrograma. Os ímãs são separados com seus polos magnéticos em sentido contrário, isto é, enquanto que um polo magnético é considerado norte, o outro polo do outro lado da faixa de alumínio é considerado sul, de modo que um gradiente magnético forte é criado na direção vertical acima da faixa de alumínio. As partículas magnéticas no fluido sofrem uma forte pressão para baixo. Estas partículas migram através do fluido para a superfície de vidro, onde são depositadas em linhas perpendiculares à direção do fluxo do fluido. As linhas são formadas porque as partículas se alinham com o polo norte voltado para o polo sul, etc. As linhas são separadas umas das outras por uma certa distância porque as partículas serão mutuamente repelidas se uma partícula alinhada for forçada diretamente sobre uma outra partícula alinhada. Depois que todo o fluido de uma determinada amostra tiver escoado através do ferrograma, faz-se correr uma solução fixadora através do ferrograma, para remover o fluido residual. Depois que o fixador seca, o que leva poucos minutos, o ferrograma está pronto para observação, usando-se um microscópio.

O FERRÓGRAFO "DR"

O Ferrógrafo "DR" opera com base no mesmo princípio do Ferrógrafo Analítico, com relação à precipitação de partículas. Ao invés de serem precipitadas em uma superfície plana, as partículas são depositadas no fundo de um tubo de vidro, que é sujeito a um forte gradiente magnético, como descrito acima para a preparação do ferrograma. Feixes de fibra ótica dirigem a luz através do tubo de vidro em duas posições, correspondentes aos lugares onde as partículas grandes e pequenas são depositadas. Um esquema do Ferrógrafo "DR" é mostrado na fig. 2. A redução na intensidade da luz, correspondente ao número de partículas depositadas no tubo de vidro é detetada e mostrada eletronicamente. O instrumento é zerado quando o óleo cobre pela primeira vez os canais de luz, antes que muitas partículas se precipitem, para ajustar-se à opacidade do óleo. Depois que um determinado volume de amostra passa através do tubo de vidro, duas leituras são obtidas, respectivamente para as grandes e pequenas partículas. Para a monitoração de rotina da máquina, altas leituras demandariam um ferrograma para exame microscópico.

Do ponto de vista matemático podemos definir um índice de severidade do desgaste I_S tal que :

$$\begin{aligned} I_S &= (A_L + A_S) (A_L - A_S) \\ &= A_L^2 - A_S^2 \end{aligned}$$

onde:

A_L = leitura da máxima porcentagem da área coberta, na posição de entrada do ferrograma (partículas acima de 5,44 μ).

A_S = leitura da máxima porcentagem da área coberta, na posição de 50,44 μ , (partículas de 1 a 2,44 μ).

A parcela ($A_L + A_S$) representa a concentração total de partículas de desgaste no óleo lubrificante.

A parcela ($A_L - A_S$) representa a severidade do desgaste. Por exemplo, as curvas dos valores cumulativos de ($A_L + A_S$) e ($A_L - A_S$) em função do tempo no mesmo gráfico são bastante informativas quanto às tendências de desgaste da máquina em questão.

O FERRÓGRAFO "ON-LINE"

O Ferrógrafo "On-Line" monitora o grau de fragmentos de desgaste em um sistema hidráulico ou de lubrificação enquanto o sistema monitorado está em operação. Os fragmentos de desgaste são separados do lubrificante do sistema monitorado por um campo de alto gradiente magnético, e a medição quantitativa dos fragmentos é alcançada por meio de um sensor capacitivo de efeito de superfície. Desde que a separação dos fragmentos é feita de modo a proporcionar a distribuição das partículas de acordo com o seu tamanho, duas medições quantitativas são feitas. Estas medições dão informação sobre a concentração total de fragmentos e o percentual de leitura devido a grandes partículas (maiores que aproximadamente 5,44 μ). A concentração de fragmentos de desgaste é determinada relacionando-se o depósito total de fragmentos ao volume de óleo de onde eles foram extraídos. O fluxo do lubrificante através do sensor é regulado mecanicamente de modo que uma medição combinada de temperatura e tempo permite que o volume total seja computado. Uma vez que uma medição completa tenha sido feita, o sistema se recicla, purgando a célula sensora, e a operação é repetida. O controle do sistema é automatizado. Leituras anormalmente altas novamente demandariam um ferrograma, como é o caso do Ferrógrafo "DR", para se descobrir a causa da excessiva quantidade de fragmentos de desgaste.

O MICROSCÓPIO

Os Ferrogramas são examinados com um microscópio especial, equipado tanto com fontes de luz refletida como com fontes de luz transmitida, que podem ser utilizadas simultaneamente. Isto combina as características de um microscópio biológico com as de um microscópio metalúrgico. Um método recomendado para separar as partículas de metal de compostos, material orgânico, etc, é usar-se luz vermelha refletida e luz verde transmitida. Este esquema de iluminação, chamado "Iluminação Bicromática", mostrará metal como vermelho, e não-metal como verde, porque partículas metálicas livres bloquearão a luz verde vinda de baixo e refletirão a luz vermelha, enquanto que partículas de não-metal em seções finas permitirão a transmissão da luz verde vinda de baixo. Luz polarizada pode também ser usada para qualquer um dos dois esquemas de luz. Objetiva metalúrgica (seca) é usada. O microscópio é equipado também com dispositivos de câmara e um leitor de ferrograma que proporciona uma medição de extinção de luz determinada mecanicamente, que corresponde à concentração de partículas em vários lugares do ferrograma.

DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS

Partículas ferrosas são depositadas em um ferrograma de acordo com o tamanho, porque a força que atua sobre uma partícula é proporcional ao volume, enquanto que a resistência viscosa do fluido de suspensão é proporcional à área da superfície. Assim sendo, para esferas, a força aumenta com o cubo do diâmetro, mas a resistência aumenta com o quadrado do diâmetro. As maiores partículas ferrosas são portanto depositadas na região de entrada do ferrograma, onde o fluido toca primeiramente a superfície de vidro. A fig. 3 indica um padrão típico de deposição, embora partículas individuais não possam ser vistas a olho nu. Em uma posição mais acima no ferrograma todas as partículas ferrosas maiores do que um tamanho característico já terão sido precipitadas. Próximo à saída final do ferrograma, partículas ferrosas maiores do que cerca de $0,2 \mu\text{m}$ (20 nanômetros) terão sido precipitadas. Para partículas não-ferrosas, como por exemplo alumínio, latão, metal branco etc, a precipitação ocorrerá porque estes materiais são fracamente magnéticos. Entretanto, a deposição destes materiais será menos seletiva com relação ao tamanho. Consequentemente, grandes partículas de metal não-ferroso poderão ser encontradas em qualquer lugar ao longo da extensão do ferrograma. A força magnética agindo na partícula de desgaste é dada por

$$F = VKH \, dH/dx$$

onde:

F = força magnética agindo na partícula

V = volume da partícula

K = susceptibilidade magnética volumétrica

H = intensidade do campo magnético

dH/dx = a taxa de variação da intensidade do campo magnético na direção perpendicular ao Ferrograma.

As partículas menores que $1 \mu\text{m}$ são saturadas magneticamente e depositam-se perto da saída do Ferrograma, portanto contribuindo para a leitura do Ferrôgrafo "DR". As partículas entre 1 e $5 \mu\text{m}$ são as de interesse primário e contribuem para as leituras de densidade no Ferrôgrafo "DR". Na equação (1) os parâmetros K e dH/dx influenciam fortemente a força magnética.

AS PARTÍCULAS DE DESGASTE

O exame do ferrograma no microscópio bicromático revela detalhes de tamanho, forma e quantidade de partículas, a partir das quais a condição das partes lubrificadas à óleo pode ser avaliada(6). Máquinas em operação normal usualmente geram pequenas partículas chatas a uma taxa baixa e constante. Se o número de partículas aumenta, e principalmente a razão entre as partículas grandes e as pequenas, isto é uma indicação de que um processo mais severo começou. A geração

falha da superfície de desgaste. O desgaste abrasivo, que é análogo a um processo de corte imperfeito, gera partículas em forma de laços (loops), espirais e fios retorcidos. O aumento no número e no tamanho destas partículas mostra que um mecanismo de desgaste abrasivo está se processando rapidamente. Vários mecanismos geram partículas características. Seis tipos de desgaste foram identificados com desgaste de deslizamento (sliding) (7).

Partículas de formas mixtas são associadas ao desgaste durante o "amaciamento" (break-in). Pequenos discos são associados a desgaste normal por fricção. À medida em que os parâmetros de operação se tornam mais árduos, as partículas metálicas de desgaste por fricção aumentam de tamanho, oxidam-se, e finalmente, pouco antes da falha, grandes partículas metálicas, por desgaste exacerbado, são produzidas. Três tipos de partículas são associadas a mecanismo de rolamento. Estes são esferas, pedaços multi-angulados de partículas laminadas. Esferas são geradas por micro rachaduras abertas nas superfícies de rolamento. Pedaços multi-angulados representam material removido à medida em que elementos do rolamento se espedaçam. Partículas laminadas, que são discos grandes e muito finos, resultam do material sendo laminado através do contato de rolamento. Rotação e deslizamento (sliding) combinados, como em engrenagens, produzem lascas e raspas (scuffing). A falta prolongada de lubrificação resultará em partículas de desgaste parcialmente oxidadas.

IDENTIFICAÇÃO DE PARTÍCULAS

A determinação da composição das partículas no ferrograma pode estabelecer suas origens. O lugar da deposição, refletividade e cor das partículas no ferrograma ajudam na sua identificação. Se disponível, a análise por Espectrometria em Raio-X, em conjunção com um microscópio de varredura (scanning) de elétrons pode estabelecer a composição elementar. Senão o simples aquecimento do ferrograma permitirá a caracterização em largas classes de ligas pelo exame das cores das camadas (disposição) de óxido (8). Por exemplo, após colocar o ferrograma sobre uma placa aquecida a 330°C por 90 segundos, uma camada de cor azul indicaria uma liga de aço baixa, como por exemplo aço para ferramentas e aço temperado, que pode conter até cerca de 1.5% de carbono, e uma camada de cor de palha indicaria liga de aço moderado, como por exemplo ferro fundido. Aço inoxidável não será afetado a 330°C, mas mostrará coloração de camadas a 500°C. Ligas de chumbo e estanho, que são muito usadas em rolamentos comuns, derreterão parcialmente, contrair-se-ão e se oxidarão fortemente em torno de 330°C, de modo que podem ser identificadas imediatamente. Ocasionalmente, uma amostra do lubrificante mostrará uma anormal concentração de ferro quando submetida à análise espectrométrica. Efetuando-se um Ferrograma, às vezes é visto que o ferro não está em forma de partículas abrasivas, mas sim em forma de Fe_2O_3 (óxido de ferro), ou ferrugem. As partículas de desgaste aparecem com cor azulada quando o ferrograma é aquecido a aproximadamente 330°C durante 90 segundos. O mecanismo do desgaste corrosivo tem suas características próprias, que podem ser utilizadas para a sua identificação. O óleo lubrificante neste caso torna-se incompatível com as partículas de desgaste e presumivelmente com a superfície. As partículas formam compostos, possivelmente cloretos ou ácidos. No microscópio bicomático, quando usamos iluminação vermelha ou verde, os compostos aparecem verdes e os metais vermelhos. Os óleos lubrificantes na base de poliéster podem tornar-se corrosivos se materiais incompatíveis são usados como selantes. Por exemplo, quando uma gaxeta de neopreno é utilizada no lugar de uma de Buna-N no sistema de lubrificação, os resultados podem ser desagradáveis para o pessoal da manutenção.

EQUILÍBRIO DA CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS EM ÓLEO DE MÁQUINA

O Ferrôgrafo "DR" e o "On-Line" fornecem informação quantitativa sobre a concentração e distribuição de tamanho das partículas de desgaste. Esta informação é útil para monitorar as condições da máquina porque a experiência tem mostrado que a concentração das partículas e a sua distribuição de tamanho no óleo lubrificante do equipamento normalmente em operação, alcança um equilíbrio dinâmico. Dados comprovando isto têm aparecido na literatura para moto

res a jato, motores movidos a diesel (10), caixas de engrenagens (11), redutores e máquinas com rolamentos de esfera (12). Isto ocorre porque a taxa de perda de partículas, devido à filtração, sedimentação, partículas sendo pulverizadas em contatos severos, dissolução devida a ataques químicos, etc, alcança um equilíbrio dinâmico com a taxa de geração de partículas. Se óleo livre de partículas é introduzido em uma máquina funcionando em condições estáveis (como por exemplo velocidade constante, carga, temperatura de entrada do óleo e temperatura interior do resfriador), a concentração das partículas irá se aproximar assintoticamente da concentração de equilíbrio à medida em que o óleo circula através do sistema de óleo. Um típico caminho de circulação de óleo é mostrado na fig. 5.

UM TÍPICO CAMINHO DO FLUXO DE ÓLEO DE MÁQUINA

Claramente a taxa de perda e o tempo em alcançar o equilíbrio são uma forte função do tamanho das partículas. Para partículas tão grandes que a eficiência de retenção no filtro é de essencialmente 100%, o equilíbrio será estabelecido por uma passagem do óleo através da máquina. Consequentemente, a amostragem é recomendada apenas no sentido descendente do fluxo, a fim de que partículas maiores, que são indicativas de um desgaste anormal, não se percam no reservatório ou no filtro. Partículas pequenas, que têm uma menor eficiência de retenção, levarão um tempo muito maior para atingirem um equilíbrio dinâmico, a concentração final será alta porque partículas de ciclos anteriores do óleo através do sistema continuarão a existir, e o ponto de amostragem não será tão importante como para grandes partículas. Na verdade, foi mostrado em outro trabalho (13), em um modelo matemático destes conceitos, que a concentração de equilíbrio de partículas de desgaste é um produto da taxa de geração pela recíproca da eficiência de remoção.

Há uma diferença fundamental entre dados espectrométricos e dados ferrográficos obtidos da mesma máquina. A fig. 6 mostra como leituras espectrométricas e leituras ferrográficas variam à medida em que uma máquina se modifica do desgaste normal de amaciamento (break-in) para desgaste anormal. As leituras do ferrógrafo permanecem mais ou menos as mesmas durante o desgaste normal, mas as leituras do espectrômetro aumentam linearmente. Isto é consistente com o modelo de equilíbrio de concentração de partículas, quando se considera que a leitura do espectrômetro integra o conteúdo de metal desde o grau molecular ao tamanho da partícula maior que é vaporizada pela chama. Partículas muito pequenas têm eficiência de retenção decrescente à medida em que o tamanho decresce, até que o tamanho molecular é alcançado, quando o metal dissolvido se mistura ao fluido que o está transportando, e a eficiência de remoção iguala zero. A contribuição do metal dissolvido à leitura do espectrômetro aumentará com o tempo, desde que o óleo não se modifique, porém a concentração de partículas grandes, medidas pelo ferrógrafo, ficará em equilíbrio dinâmico. A fig. 6 mostra que a Ferrografia mede a taxa de desgaste, enquanto que a Espectrometria mede o desgaste total.

COMPARAÇÃO DE DADOS ESPECTROMÉTRICOS E DADOS FERROGRÁFICOS

Espectrômetros e Ferrógrafos medem dois regimes diferentes de tamanho de partículas. Espectrômetros são sensíveis a partículas desde o tamanho atômico até partículas de vários micrômetros em aresta maior, enquanto que os ferrógrafos são sensíveis a partículas medindo desde alguns décimos de micrômetros até alguns centésimos de micrômetros. A fig. 7 mostra a sensibilidade aproximada da Espectrometria, Ferrografia e Detetores de Lascas (chips). A Ferrografia é sensível a uma gama de tamanho de partículas que o Espectrômetro e o Detetor de Lascas não vêem, mas sem dúvida deve-se admitir que esforços estão sendo feitos pelos fabricantes tanto do Espectrômetro como do Detetor de Lascas para preencher esta lacuna.

APLICAÇÕES

Pressões econômicas estão causando uma mudança da manutenção planejada das máquinas para a manutenção preventiva. Ênfase crescente tem sido dada a técnicas simples porém confiáveis de monitoração da condição do equipamento para evitar falhas durante a operação, e para detetar a deterioração de componentes vitais, de modo que a manutenção possa ser efetuada antes que o ponto de quebra seja alcançado.

Para ilustrar o custo envolvido, sabe-se que a revisão geral de uma turbina a jato alcança cerca de 1/8 do seu custo. Em 1977 os valores eram os abaixo:

- a) US\$ 67 dólares/hora de vôo para manutenção programada
- b) US\$ 140 dólares/hora de vôo para manutenção não programada
- c) US\$ 36.87 dólares/hora de vôo para recondiçãoamento (overhaul)

Portanto o desgaste custou ao proprietário da turbina US\$ 243.87 dólares por hora de vôo.

A Ferrografia foi introduzida com sucesso para a monitoração "on-condition" de aeronaves militares. Recentemente um Seminário sobre Ferrografia foi patrocinado pelo Programa Conjunto de Análise de Óleo Lubrificante da Junta das Forças Armadas dos E.U.A., em Pensacola - Flórida, onde alguns oradores descreveram como eles foram capazes de detetar falha incipiente em vários motores a jato militares. Na maioria dos casos a parte com defeito era um rolamento de esfera. Em alguns casos a Ferrografia era a última técnica para análise de óleo para detetar problemas. Em outros casos a Ferrografia era usada para confirmar dados espectrométricos ou luzes de alarme do detetor de lascas. Sugere-se que um ferrograma analítico seja feito e examinado, antes que qualquer equipamento caro seja desmontado para ser inspecionado, para confirmar se a inspeção é necessária. À parte as falsas indicações provenientes de outras técnicas de monitoração da condição da máquina que a Ferrografia pode confirmar ou refutar, certos tipos de problemas podem ser corrigidos sem muito esforço ou despesa. Um exemplo seria contaminação abrasiva, diagnosticada pela presença de partículas cristalinas não-metálicas, e desgaste por corte, que pode ser corrigido pela mudança do óleo e do filtro de óleo. A Marinha Dinamarquesa (15) tem aplicado com sucesso a Ferrografia para equipamentos tais como caixas de engrenagem (redutores), turbinas de motores a diesel e sistemas hidráulicos de descarga. Muitos problemas foram detetados; a maioria requeria ajustes de menor importância ou troca de óleo, mas várias falhas sérias foram detetadas a tempo de prevenir danos secundários extensos, particularmente para um certo tipo de redutor que pode ser movido tanto por uma turbina como por um motor a diesel, dependendo se velocidade militar ou velocidade de cruzeiro é desejada. É certo que seis redutores deste tipo foram salvos durante os últimos dois anos. Entretanto, o benefício mais significativo da Ferrografia é que períodos de inspeção estão atualmente sendo mais espaçados. Formalmente, um princípio de manutenção "hard-time" era usado, que exigia que o equipamento fosse inspecionado ou substituído depois de um período específico de operação. Este período era fixado pela avaliação estatística da probabilidade de quebra, sendo o período suficientemente curto para que não fosse provável que o equipamento viesse a falhar. A manutenção "hard-time" apresenta três desvantagens: 1) Apesar de escolher um curto período de manutenção, falhas inesperadas não são totalmente eliminadas. 2) Tal programa é desperdiçador, pois a maior parte do equipamento sendo inspecionado poderia dar produção livre de problemas por um período muito maior. 3) A inspeção em si causa falhas devido à mão-de-obra de má qualidade e peças de reposição em mau estado. Atualmente a Marinha Dinamarquesa está em transição da manutenção "hard-time" para manutenção baseada na monitoração da condição. A Ferrografia tem sido usada para otimizar parâmetros de operação de motores a diesel, para minimizar o desgaste (10). Por exemplo, mudanças na temperatura do óleo interior, carga e velocidade fazem variar o tamanho e a quantidade das partículas de desgaste produzidas, e portanto a taxa

de desgaste. Para motores a diesel, ou outros motores de combustão interna, a monitoração da condição pelo uso da Ferrografia permite a identificação das partes da máquina que estão com problemas (16). O tratamento de aquecimento do ferrograma pode fazer a distinção entre ligas baixas de aço de onde girabrequins são feitos, e aço forjado, de onde camisas e anéis são usualmente produzidos. Além do mais, ligas de chumbo e estanho, ligas de cobre, e alumínio, podem ser facilmente identificadas, o que pode indicar problemas de produção.

O que foi dito, espera-se, demonstra que a Ferrografia tem sido usada com sucesso para vários equipamentos como turbinas, motores de combustão interna, caixas de engrenagem (redutores), e tanto para rolamentos de esfera como para cilíndricos, equipamento que será encontrado em várias indústrias.

Um recente relatório elucidativo feito pelo Centro de Pesquisa Hidráulica - (17) documenta a Ferrografia como um poderoso instrumento de monitoração de sistemas hidráulicos. A Ferrografia está sendo usada atualmente para a monitoração da condição nas indústrias de energia, química, naval e de transporte (3). Além da monitoração da condição, a Ferrografia é usada pelos fabricantes de equipamento pesado e automotivo, como um meio de avaliar novos lubrificantes (como por exemplo fluidos aquosos) e aditivos lubrificantes, por companhias produtoras de óleo, e como um instrumento de pesquisa em universidades e outros estabelecimentos de ensino.

DESENVOLVIMENTOS RECENTES

Na época desta publicação, trabalhos estavam em progresso para desenvolver um sistema para precipitação de materiais não-metálicos, como plásticos, elastômeros, fibras orgânicas etc, que podem ser significativos para a falha de sistemas hidráulicos.

Dois séculos de estudos não conseguiram revelar os mistérios da lubrificação das articulações humanas, e agora a Ferrografia está sendo aplicada para o estudo das partículas do fluido sinovial, como um auxílio para o diagnóstico de artrite degenerativa e a investigação do desgaste de articulações humanas artificiais.

CONCLUSÃO

A FERROGRAFIA, um método de análise de partículas de desgaste para a monitoração da condição do equipamento foi aqui descrito, incluindo uma explicação de porque a concentração das partículas de desgaste permanece mais ou menos a mesma de amostra para amostra durante o período normal de vida de operação de uma máquina. Algumas aplicações foram discutidas, dando ênfase à monitoração da condição, que é reconhecida como o uso potencial mais importante da Ferrografia nas indústrias.

Agradecimentos:

Ao Dr. Drapinski da Universidade de São Paulo -
pela parte que se refere a Desgaste

À Janice Mazzilli Louzada -
pela tradução e datilografia

Ao Engº Claudio Makarovsky -
pelos desenhos

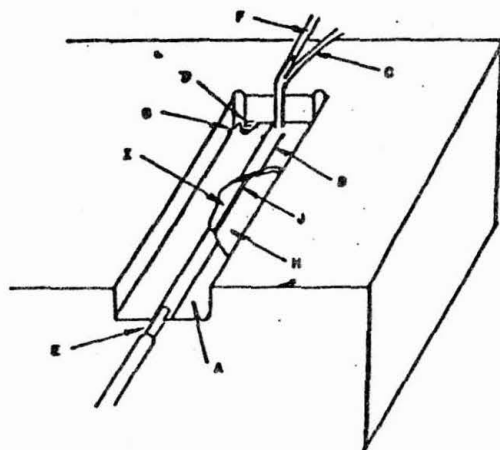


FIGURA 1

EQUIPAMENTO P/ PREPARAÇÃO DO FERROGRAMA

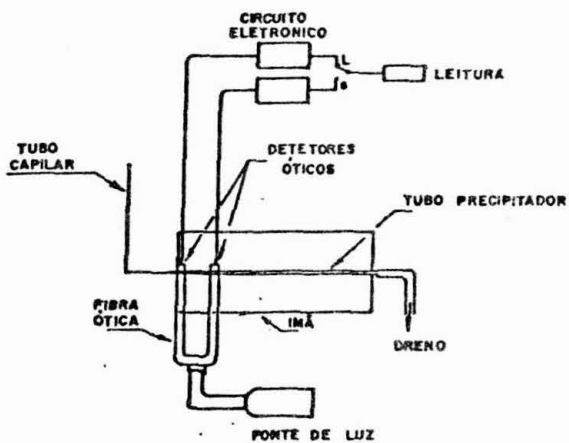


FIGURA 2

ESQUEMATICO DO FERROGRAFO "DR"

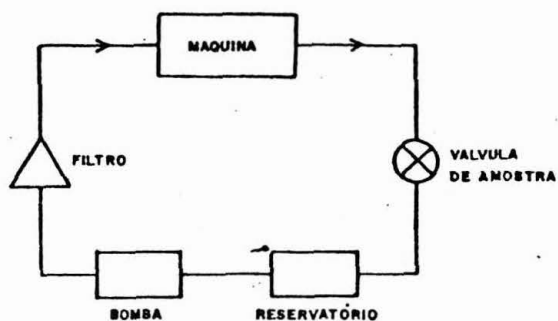
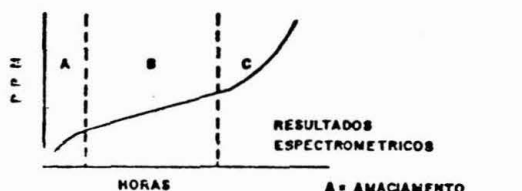


FIGURA 4
CIRCUITO DE LUBRIFICAÇÃO TÍPICO



A = AMACIAMENTO
B = DESSASTE NORMAL
C = DESSASTE ANORMAL

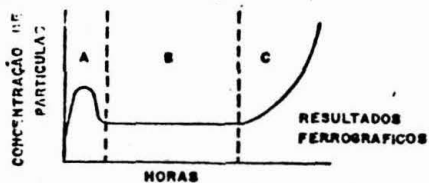


FIGURA 5
RESULTADOS COMPARATIVOS ESPECTROMETRIA VS. FERROGRAFIA

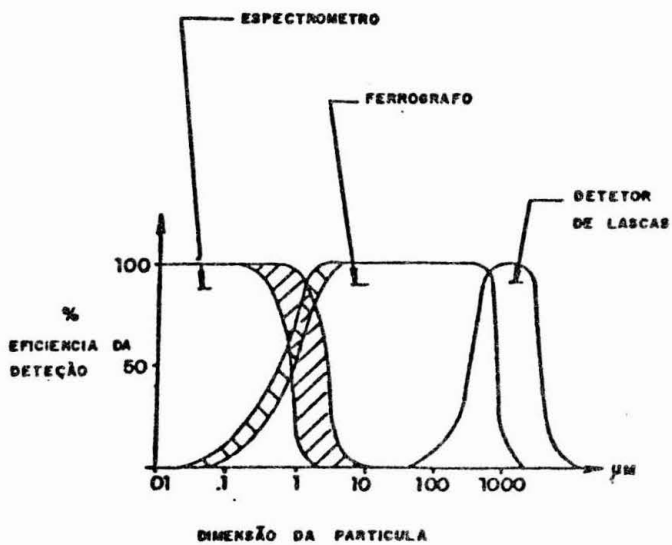


FIGURA 6.
 RESULTADOS COMPARATIVOS EFICIENCIA DE DETEÇÃO

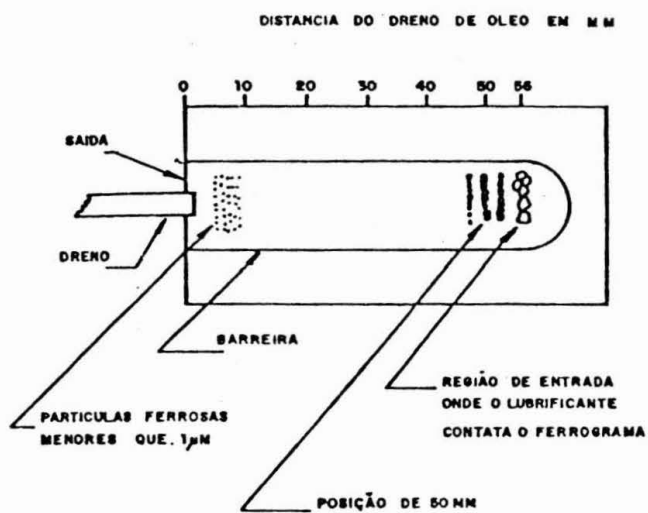


FIGURA 3.
PADRÃO DE DEPOSIÇÃO EM UM FERROGRAFO

