

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS/MG

ENGENHARIA MECÂNICA

YURI DE ANDRADE BERNARDES

**A IMPORTÂNCIA DA TÉCNICA FERROGRÁFICA NO MONITORAMENTO DO
DESGASTE DA MÁQUINA**

**Varginha
2011**

YURI DE ANDRADE BERNARDES

**A IMPORTÂNCIA DA TÉCNICA FERROGRÁFICA NO MONITORAMENTO DE
DESGASTE DA MÁQUINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Ms. Alexandre de Oliveira Lopes.

**Varginha
2011**

YURI DE ANDRADE BERNARDES

**A IMPORTÂNCIA DA TÉCNICA FERROGRÁFICA NO MONITORAMENTO DE
DESGASTE DA MÁQUINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Prof. Ms. Alexandre de Oliveira Lopes

Prof. Ms. Luiz Carlos Vieira Guedes

Prof. Esp. Eduardo Henrique Ferroni

OBS.:

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por ter me guiado durante este período de crescimento profissional e pessoal e a minha família por ter ficado ao meu lado me incentivando a nunca desistir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que me deram apoio no desenvolvimento do trabalho e compartilharam seus conhecimentos e experiências comigo e também agradeço a minha família por acreditarem no meu potencial.

“O sucesso não ocorre por acaso, nasce sobretudo de muito esforço e dedicação.”
Henry Ford

RESUMO

A preocupação maior do departamento de manutenção dentro de uma indústria é de manter as máquinas em bom estado de funcionamento e procurar aproveitar ao máximo o tempo de sua vida útil. Baseando no fato de que nenhuma máquina é igual e todas sofrem diferentes tipos de desgaste antes de falhar, o objetivo do estudo é apresentar uma técnica de manutenção preditiva pouco usada e de importante aplicabilidade para monitorar os desgastes que a máquina vem sofrendo durante seu funcionamento, para que a mesma possa desempenhar suas funções adequadamente sem interrupções. O estudo apresenta a técnica ferrográfica, desde seu conceito a sua aplicabilidade, e o quanto ela tem se mostrado eficiente na diagnose das máquinas, através de análises precisas feitas para o monitoramento, auxiliando o departamento de manutenção e programando uma intervenção quando necessário.

Palavras-chave: Desgaste. Manutenção. Manutenção preditiva. Técnica ferrográfica.

ABSTRACT

The greatest concern of the maintenance department inside of an industry is to keep the machinery in good state and to try to use it maximum of its life time. Based on the fact that no machine is equal and all of them suffer of different kinds of wear before failing, the objective of this study is to present a predictive maintenance technique with little use and with important applicability to monitor wear that the machine is suffering during its functioning, so it can perform its functions without interruption. The study presents the ferrography technique, from its concept to its applicability, and how it has been shown effective in the diagnosis of machines via accurate analysis made for monitoring, assisting the maintenance department and scheduling an intervention when necessary.

Key words: *Wear. Maintenance. Predictive maintenance. Ferrography technique.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de uma máquina.....	18
Figura 2 - Ferrógrafo Analítico.....	19
Figura 3 - Ferrograma pronto para o exame e instrumento de análise (ferroscópio).....	20
Figura 4 - Microfotos de ferrogramas.....	21
Figura 5 - Representação das partículas no gráfico analítico.....	22
Figura 6 - Ferrógrafo Quantitativo.....	23
Figura 7 - Exemplo de L + S baixo com PLP alto.....	24
Figura 8 - Gráfico de determinação do nível de alerta.....	25
Figura 9 - Modelo de etiqueta.....	26
Figura 10 - Teste com status normal.....	28
Figura 11 - Teste com status crítico.....	29
Figura 12 - Efeito da viscosidade.....	30
Figura 13 - Prolongamento da vida útil.....	31
Figura 14 - Indicação de defeito.....	32
Figura 15 - Limitação de ensaios convencionais em óleo lubrificante.....	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 MANUTENÇÃO	11
2.1 Manutenção corretiva	12
2.1.1 Manutenção corretiva não planejada.....	13
2.1.2 Manutenção corretiva planejada	13
2.2 Manutenção preventiva	14
2.3 Manutenção preditiva	14
3 DESGASTE	15
4 FERROGRAFIA	16
4.1 Histórico	17
4.1.1 A técnica no Brasil	17
4.2 Princípios da técnica ferrográfica	17
4.3 Processo	18
4.3.1 Exame Analítico (AN).....	19
4.3.2 Exame Quantitativo (DR).....	22
4.4 Determinação do nível de alerta da máquina	24
4.5 Aplicações da técnica ferrográfica	25
4.5.1 Avaliação da máquina para aplicação da técnica.....	25
4.5.2 Escolha da máquina a ser monitorada	26
4.6 Interpretação dos laudos	27
5.0 CASOS HISTÓRICOS DA APLICAÇÃO E MONITORAMENTO ATRAVÉS DA TÉCNICA FERROGRÁFICA	30
5.1 Caso 01 – Redutor de velocidade de uso em equipamentos ferroviários	30
5.2 Caso 02 – Compressor de ar tipo parafuso	30
5.3 Caso 03 – Compressor frigorífico	32
5.4 Caso 04 – Regulador de velocidade de turbina hidráulica	32
6 CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da indústria e a tecnologia aplicada nos equipamentos, necessitando-se cada vez mais de cuidados especiais, as técnicas de manutenção aplicadas também tiveram que sofrer mudanças durante o tempo para se adequarem aos novos processos e aos gigantes da indústria. Portanto, o presente estudo visa apresentar os conceitos e a aplicabilidade da técnica ferrográfica, demonstrando sua importância no monitoramento de desgaste das máquinas presentes e de total importância no processo produtivo.

O tema estudado deve-se a causa do não conhecimento e interesse das indústrias em procurarem monitorar seus equipamentos de forma eficiente, buscando sempre um melhor funcionamento e a melhor hora de repará-los, se prendendo ao se quebrar eu arrumo. Isso acontece pela falta de interesse das mesmas em sempre inovar os métodos de trabalho e estarem mais preocupados com a lucratividade, e esquecem que os produtos de qualidade estão ligados ao bom funcionamento dos equipamentos.

O estudo feito através de pesquisas, análises e dados colhidos, tem como objetivo demonstrar a suma importância que uma técnica julgada de luxo, mais de aplicabilidade totalmente simples tem no processo produtivo, pois a mesma se aplicada de maneira funcional consegue prever uma possível falha, podendo ocorrer a intervenção ou não da manutenção, bastando somente monitorar o equipamento pela mesma caso não ocorra a parada.

Os dados e laudos estudados foram fornecidos por um laboratório especializado no assunto, o qual foi pioneiro da técnica no Brasil, portanto o presente estudo tem como finalidade apresentá-los de forma objetiva e clara concluindo através dos mesmos a importância que a técnica apresenta na aplicação em uma indústria e no monitoramento de desgaste dos equipamentos.

2 MANUTENÇÃO

Antigamente as indústrias se preocupavam somente com a correção não planejada das máquinas, e a manutenção não era executada de forma racional, sendo que os serviços de reparo eram feitos somente quando se quebrava uma máquina, inexistindo as equipes para tais serviços. A maior parte dos reparos eram feitos pelos próprios operadores, restabelecendo o que se quebrava e lubrificando as partes da máquina quando julgavam adequado (BRANCO, 2008).

A administração industrial forçava o pessoal da manutenção a se preocuparem em resolver os reparos e falhas da máquina o mais rápido possível e a efetuarem serviços que evitassem e prevenisse a ocorrência de falhas de equipamentos importantes no processo produtivo (BRANCO, 2008).

Esta ficou conhecida como a primeira geração da manutenção que antecedeu a segunda guerra mundial, onde os equipamentos não eram tão evoluídos e complicados.

“[...] durante a segunda guerra mundial que a manutenção se firmou como necessidade absoluta [...]” (VIANA, 2002, p. 2), e junto com a evolução dos equipamentos as técnicas de trabalho foram se sobressaindo (VIANA, 2002).

A presença de equipamentos cada vez mais sofisticados e de alta produtividade fez a exigência de disponibilidade ir às alturas, os custos de inatividade ou de subatividade se tornaram altos, bem altos. Então não basta se ter instrumentos de produção, é preciso saber usá-los de forma racional e produtiva (VIANA, 2002, p. 1).

Com o decorrer da segunda guerra mundial começou a verificar-se que era essencial e de extrema importância aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos das indústrias buscando uma maior produtividade no processo, e isto levou a idéia de que as falhas e defeitos poderiam ser evitados, surgindo com isso à prevenção, marcando com estes fatos a segunda geração das atividades da manutenção (PINTO; XAVIER, 2001).

A partir da década de 70 a terceira geração da manutenção se iniciou permitindo um aceleração no processo e grandes mudanças industriais. Sugeria-se então que as intervenções da manutenção deveriam ser reduzidas ao máximo, evitando gastos, tempo, pessoas e desvio da produtividade, reforçando o conceito da manutenção preditiva focando no monitoramento dos equipamentos (PINTO; XAVIER, 2001).

Percebe-se então que a manutenção veio sofrendo drásticas mudanças de conceitos durante os tempos e já não mais se admite a execução de serviços de forma irracional.

A necessidade de uma manutenção eficiente e adequada se torna primordial com o desenvolvimento das máquinas que estão cada vez mais rápida, mais complexa, mais leve e com consequentes deficiências, e se torna o centro da indústria que busca uma produtividade adequada sem interrupções de suas máquinas (NEPOMUCENO, 1989).

2.1 Manutenção corretiva

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994, f. 7) a manutenção corretiva é a “manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”.

Para Viana (2002, p. 10) a “[...] manutenção corretiva é a intervenção necessária imediatamente para evitar graves consequências aos instrumentos de produção, à segurança do trabalhador ou ao meio ambiente”.

E para Branco (2008, p. 35) a “manutenção corretiva é toda atividade de manutenção realizada em uma máquina que esteja em falha”.

Portanto, de acordo com esses conceitos a manutenção corretiva é executada quando ocorre uma falha do equipamento e imediatamente a mesma tem que repará-lo.

Conforme Pinto e Xavier (2001) existem duas situações específicas que levam a manutenção corretiva:

- a) desempenho deficiente apontado pelo acompanhamento das variáveis operacionais.
- b) ocorrência de falha;

E segundo os mesmos a manutenção corretiva pode ser dividida em não planejada e planejada.

2.1.1 Manutenção corretiva não planejada

A corretiva não planejada baseia-se em agir numa falha já ocorrida, não tendo o tempo suficiente para a preparação e planejamento dos serviços, ou seja, falhou agora tenho que consertar agora (BRANCO, 2008).

Ainda praticado em diversas empresas a manutenção corretiva não planejada implica de forma indireta em seus custos elevados, perdas e qualidade do produto.

Quando uma empresa tem a maior parte de sua manutenção corretiva na classe não planejada, seu departamento de manutenção é comandado pelos equipamentos e o desempenho empresarial da organização, certamente, não está adequado às necessidades de competitividade atuais (PINTO; XAVIER, 2001, p. 38).

2.1.2 Manutenção corretiva planejada

De acordo com Pinto e Xavier (2001) a corretiva planejada consiste na atuação para correção de falha ou desempenho inferior ao que se espera do equipamento, caracterizando-se pela ação sempre após a ocorrência da falha, que é aleatória, e sua aplicabilidade levam em conta fatores técnicos e econômicos.

Para Branco (2008) essa forma de corretiva se aplica as tarefas de remoção de falhas em uma data após a ocorrência da falha, ficando a máquina em estado de pane, até a data do reparo.

Segundo Pinto e Xavier (2001) para a adoção dessa prática de manutenção corretiva planejada devem-se levar em conta os seguintes fatores:

- a) possibilidade de compatibilizar a necessidade da intervenção com os interesses da produção;
- b) aspectos relacionados com a segurança, ou seja, se a falha não provoca nenhuma situação de risco para o pessoal ou para a instalação;
- c) melhor planejamento dos serviços;
- d) garantia de existência de sobressalentes, equipamentos e ferramental;
- e) existência de recursos humanos com a tecnologia necessária para a execução dos serviços e em quantidade suficiente, podendo inclusive buscar externamente a organização.

2.2 Manutenção preventiva

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994, f. 7) a manutenção preventiva tem como objetivo “[...] reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item”.

Segundo Nepomuceno (1989, p. 41) “[...] consiste na substituição de peças em períodos regulares, assim como a execução de reparos e consertos devido a quebras ou falhas inesperadas”, mantendo sempre a funcionalidade do equipamento, executando a mesma no momento adequado.

Para Viana (2002, p. 10) “podemos classificar como manutenção preventiva todo serviço de manutenção realizado em máquinas que não estejam em falha, estando com isto em condições operacionais ou em estado zero defeito”.

E para Branco (2008) consiste em toda atividade de manutenção executada em uma máquina que esteja em condições de funcionamento, ou ainda com algum defeito.

Portanto a preventiva tem grande aplicação nas indústrias, cuja falha de um equipamento possa implicar no processo produtivo e até mesmo agredir ao meio ambiente. A utilização dessa técnica, julgada conservadora, torna possível manter os intervalos de substituição de equipamentos bem menores, às vezes desnecessárias podendo implicar em trocas e paradas desnecessárias (BRANCO, 2008).

A técnica exige que alguns fatores sejam levados em consideração para a adoção da política de prevenção, e de acordo com Pinto e Xavier (2001) são:

- a) quando não é possível a manutenção preditiva;
- b) aspectos relacionados como a segurança pessoal ou da instalação que tornam prioridade a intervenção, normalmente para substituição de componentes;
- c) equipamentos críticos de difícil liberação operacional;
- d) riscos de agressão ao meio ambiente.

2.3 Manutenção preditiva

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994, f. 7) a “manutenção preditiva permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na

aplicação sistemática de técnicas de análise [...], para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva”.

Segundo Nepomuceno (1989, p. 44) “o estabelecimento da manutenção preditiva permite que a mesma seja executada antes da falha aparecer”, com isso, a manutenção corretiva “[...] tende a ser apreciavelmente diminuída, quando não totalmente eliminada”.

São tarefas de manutenção preventiva que visam acompanhar a máquina ou as peças, por monitoramento, por medições ou por controle estatístico e tentam prever a proximidade da ocorrência da falha. O objetivo de tal tipo de manutenção é determinar o tempo correto da necessidade da intervenção mantenedora, com isso evitando desmontagens para inspeção, e utilizar o componente até o máximo de sua vida útil (VIANA, 2002, p. 12).

Portanto, a técnica trata-se do melhor aproveitamento da vida útil dos equipamentos, predizendo de forma satisfatória, com base em parâmetros, o tempo de vida útil dos componentes de equipamentos e máquinas, para que o mesmo seja bem aproveitado (BRANCO, 2008).

A técnica é baseada em análises, tais como ensaios não destrutivos, análise de óleos lubrificantes ou isolantes, análise de vibrações, análise de temperatura, ferrografia e ensaios elétricos, que definem as condições reais da máquina, podendo ser aplicadas de forma contínua ou em intervalos periódicos de acordo com o estado crítico do equipamento e impacto do problema (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002).

Para Pinto e Xavier (2001) este tipo de manutenção é conhecida também por manutenção sob condição, onde tem como objetivo indicar as condições reais do funcionamento das máquinas com base em dados coletados através das técnicas.

Portanto de suma importância e aplicabilidade, a manutenção preditiva é a que oferece melhores resultados em relação às outras, pois a mesma intervém o mínimo possível no funcionamento da máquina.

3 DESGASTE

De acordo com Nepomuceno (1989) uma das maiores fontes da diminuição da vida útil das máquinas e dispositivos industriais é o desgaste. Esse ocorre entre duas peças ou componentes que apresentam movimento relativo.

“O desgaste é um processo que dá origem a machucaduras e diminuição das superfícies que se movimentam, dando resíduos que podem eventualmente produzir efeitos secundários diversos” (NEPOMUCENO, 1989, p. 131).

Para Nepomuceno (1989) o processo de desgaste envolve uma ou mais causas, atividades ou características, e a partir delas a geração das partículas é simultânea podendo ocorrer pela falha do processo em que a máquina está adequada ou por outras partículas já existentes.

4 FERROGRAFIA

A ferrografia é uma técnica de monitoramento e diagnose das condições de uma máquina feita a partir da quantificação e análise da morfologia das partículas de desgaste encontradas em suspensão nas amostras de lubrificantes. A técnica classificada de manutenção preditiva, embora possua inúmeras outras aplicabilidades tem se desenvolvido com o objetivo de identificar e determinar os tipos de desgaste que as máquinas vêm sofrendo, contaminantes existentes, desempenho do lubrificante, etc. (BARONI; GOMES).

A ferrografia consiste na determinação da severidade, modo e tipos de desgaste em máquinas por meio de identificação da morfologia, acabamento superficial, coloração, natureza e tamanho das partículas encontradas em amostras de óleos ou graxas lubrificantes de qualquer viscosidade, consistência e opacidade (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002, p. 111).

“Muitas vezes confundida como uma técnica de análise de lubrificantes é, na verdade, uma grande técnica de análise de máquinas” (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002, p. 111).

Tal confusão se dá pelo motivo da técnica necessitar da coleta de amostras de lubrificantes para iniciar as análises, podendo ser de óleos ou graxas. Entretanto a técnica ferrográfica é aplicada não só no setor industrial, mas também realizada na área médica, com o intuito de estudar os desgastes de próteses (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002).

De acordo com Kardec, Nascif e Baroni (2002) o nome ferrografia é de origem histórica e causa confusão quando a técnica é citada, podendo induzir a idéia de se tratar de uma técnica de análise de apenas partículas ferrosas. Capaz de identificar outros tipos de metais não ferrosos como bronze, alumínio, cromo, etc., contaminantes sólidos (areia, fibras

orgânicas e inorgânicas, sais, etc.) e ainda produtos de degradação do lubrificante como a borra, gel, lacas, vernizes, etc., ela tem se mostrado eficiente na análise de equipamentos de importância na indústria, a fim de pré-determinar algumas das possíveis falhas proveniente do desgaste.

4.1 Histórico

Segundo Kardec, Nascif e Baroni (2002, p. 111) “a ferrografia foi desenvolvida, originalmente, para aplicações na aeronáutica militar em 1975 pelo Dr. Vernon C. Westcott nos EUA sob o patrocínio do Naval Air Engineering Center”.

Com a necessidade de monitoramento das máquinas usadas pela aeronáutica e a limitação que outras técnicas apresentavam, ou seja, não conseguiam antecipar a ocorrência de uma possível falha e defeito e apontar as reais causas do desgaste, o principal objetivo e motivo de seu desenvolvimento foi a de obter uma maior confiabilidade no diagnóstico das máquinas, tais como caixas de engrenagens e helicópteros militares (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002).

4.1.1 A técnica no Brasil

Somente “em 1982 a ferrografia foi liberada para o uso civil e trazida para o Brasil em 1988” (BARONI; GOMES, f. 1) pelo Professor e Engenheiro Tarcísio Armando D’Aquino Baroni Santos, pioneiro da técnica no país (TRIBOLAB).

4.2 Princípios da técnica ferrográfica

Segundo Kardec, Nascif e Baroni (2002) os princípios básicos da técnica ferrográfica são:

a) toda máquina se desgasta antes de falhar;

- b) o desgaste das máquinas e componentes geram partículas;
- c) a quantidade e o tamanho das partículas são proporcionais à severidade do desgaste;
- d) a morfologia e o acabamento superficial das partículas indicam o tipo quanto à natureza do desgaste.

4.3 Processo

A coleta da amostragem de lubrificante para a análise do lubrificante é feita de preferência com a máquina em operação ou após sua parada, de forma a ser evitada a precipitação das partículas (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002).

Segundo Kardec, Nascif e Baroni (2002, p. 112) “o ponto de coleta deve estar localizado o mais próximo possível da fonte de geração de partículas”, ou seja, o mais perto possível da máquina.

De acordo com Kardec, Nascif e Baroni (2002) devem ser evitados os pontos de coleta após o filtro ou regiões onde não ocorra a concentração das partículas.

Após a coleta das amostras, as mesmas são analisadas pelos exames Quantitativo e Analítico.

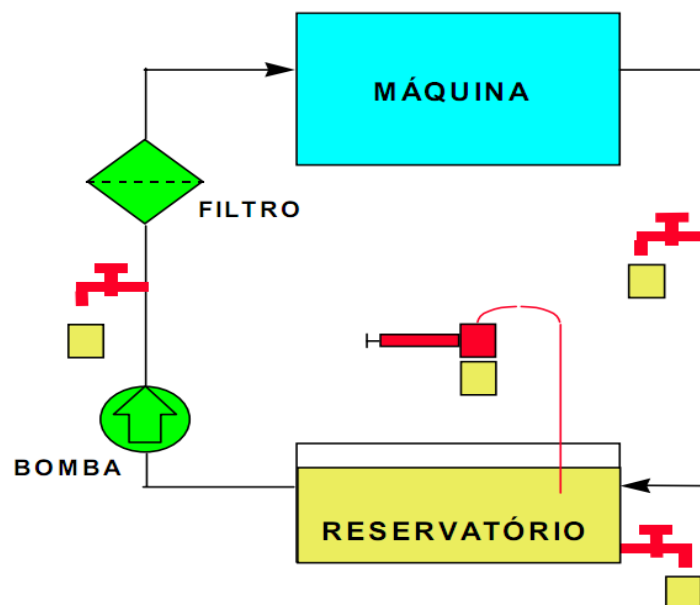


Figura 1 - Esquema de uma máquina. Fonte: Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas, 2002, p. 112

4.3.1 Exame Analítico (AN)

O exame analítico permite a observação visual das partículas encontradas no lubrificante para que sejam identificados os tipos (esfoliação, abrasão, corrosão, etc.), forma (laminares, esferas, etc.) e natureza (óxidos, polímeros, contaminantes orgânicos, etc.) do desgaste de acordo com a característica que cada uma apresenta ao serem geradas (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002).

Segundo Kardec, Nascif e Baroni (2002) sobre uma lâmina de vidro denominada ferrograma, o lubrificante é bombeado lentamente, junto a um campo magnético que retém as partículas e posteriormente são examinadas com um auxílio de microscópio óptico especial (ferroscópio).

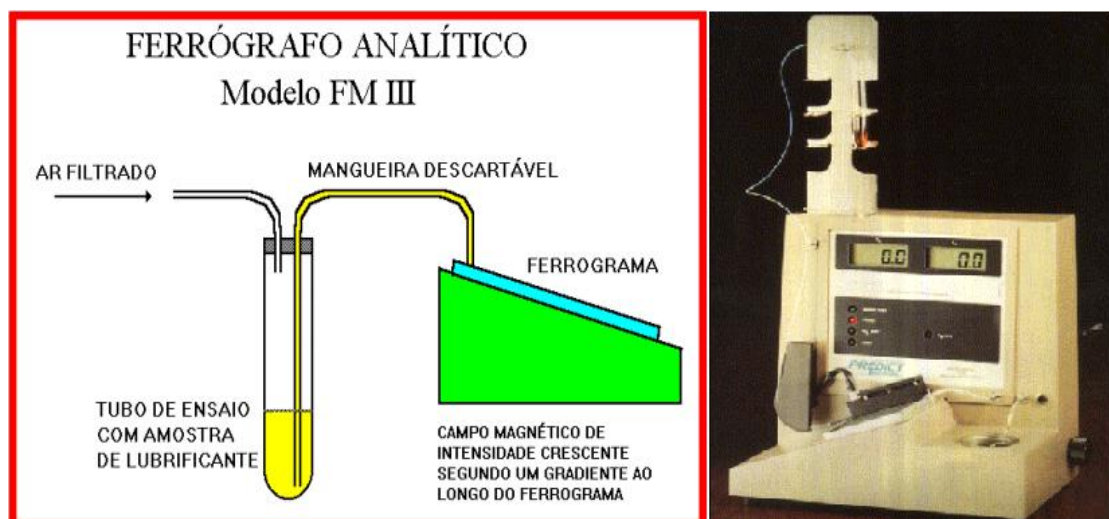


Figura 2 - Ferrógrafo Analítico. Fonte: Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas, 2002, p. 113.

O ferrograma de dimensões 25 x 60 x 0,7 mm é montado no ferrógrafo analítico sobre a ação de um campo magnético cuja distribuição das linhas de força não é uniforme, mas de intensidade menor na entrada, onde ficam retidas as partículas maiores, e de maior intensidade no final, onde as menores partículas são atraídas (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002).

Desta forma, assim que o lubrificante flui sobre o ferrograma e as partículas ferromagnéticas são atraídas, elas formam uma linha contínua de tamanho decrescente de acordo com o tamanho de cada partícula, logo se percebe que no final do ferrograma são encontradas partículas de até 0,1 μm , identificadas pela forma que se alinham seguindo a direção do campo magnético (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002).

Segundo Kardec, Nascif e Baroni, (2002) partículas não magnéticas (ligas de cobre, alumínio, prata, chumbo, etc. e contaminantes como areia, borracha, fibras de pano, papel, etc.) também são atraídas pela força do campo se depositando de forma aleatória, sendo encontradas diante de todo ferrograma.

Ao final de todo processo analítico o ferrograma é lavado, com objetivo de manter somente as partículas para o exame, e “até 98% das partículas presentes na amostra permanecem retidos na lâmina” segundo Kardec, Nascif e Baroni (2002, p. 113).



Figura 3 - Ferrograma pronto para o exame e instrumento de análise (ferroscoópio). Fonte: Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas, 2002, p. 114.

De acordo com Kardec, Nascif e Baroni (2002) os desgastes mais comuns que ocorrem são os provenientes da esfoliação, com partículas variando de 5 µm a 15 µm gerada sem a necessidade de contato metálico e sim pela força tangencial entre uma peça e outra por meio do filme lubrificante, e abrasão, com dimensões de 2 µm a centenas de microns, sendo a principal causa da contaminação por areia.



Figura 4 - Microfotografias de ferrogramas. Fonte: Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas, 2002, p. 116.

De forma geral, a quantidade e o tamanho das partículas de desgaste dependem muito da natureza da falha, e segundo Kardec, Nascif e Baroni (2002, p. 114) “considera-se como indício de problema partículas maiores do que 15 μm ”.

A taxa de incidência de cada tipo de partícula encontrada no ferrograma é representada de forma gráfica, onde as barras horizontais indicam o grau. É importante saber que cada partícula possui uma regra especial de representação no gráfico, e não é apenas levada em consideração a quantidade, mas também a gravidade do mecanismo de desgaste e o tamanho da partícula examinada (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002).

Partindo do princípio de que nenhuma máquina é igual, e que cada tipo de partícula vem de um mecanismo tribológico diferente, as análises e determinações de incidência também são diferentes. A representação no gráfico é sobre uma escala de 0 a 10, onde os limites de cada partícula dependem exclusivamente da máquina que está sendo monitorada individualmente, apresentando no mínimo a investigação de 18 tipos de partículas que são as mais comuns (FERROGRAFIA...).

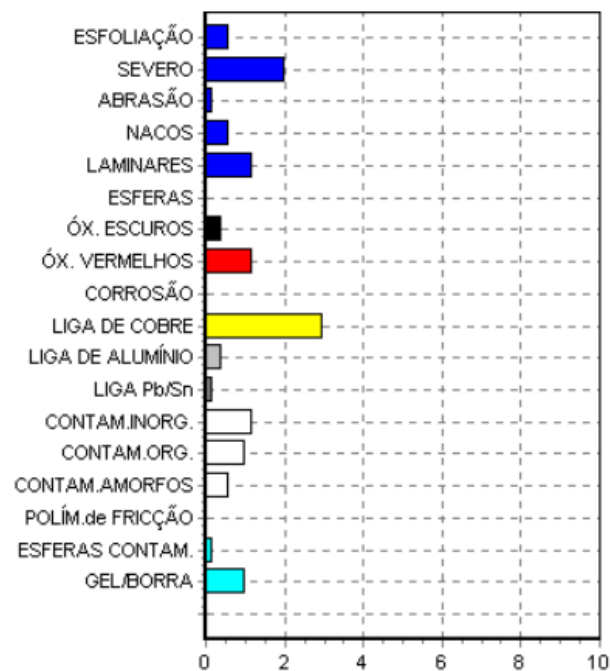


Figura 5 - Representação das partículas no gráfico analítico. Fonte: FERROGRAFIA: Perguntas mais frequentes, f. 6.

O exame analítico e a estabilidade da concentração das partículas que irão definir as condições da máquina se são ou não aceitáveis (FERROGRAFIA...).

De qualquer forma, é importante realizar o exame analítico de tempos pré-determinados e manter o acompanhamento da evolução da incidência, para tomar decisões quanto à operação ou reparo da máquina.

4.3.2 Exame Quantitativo (DR)

O exame quantitativo utiliza os mesmos princípios do exame analítico, porém a diferença está no método de leitura que prioriza a quantidade de partículas e no corpo de prova (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002).

O corpo de prova, ou seja, o tubo precipitador é sobreposto a um campo magnético especial, da mesma forma que o ferrograma. Duas regiões do tubo precipitador são iluminadas de baixo para cima por uma fonte de luz controlada, e as sombras formadas pelas partículas que se depositam no tubo são observadas por fotocélulas ligadas a um circuito microprocessado (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002).

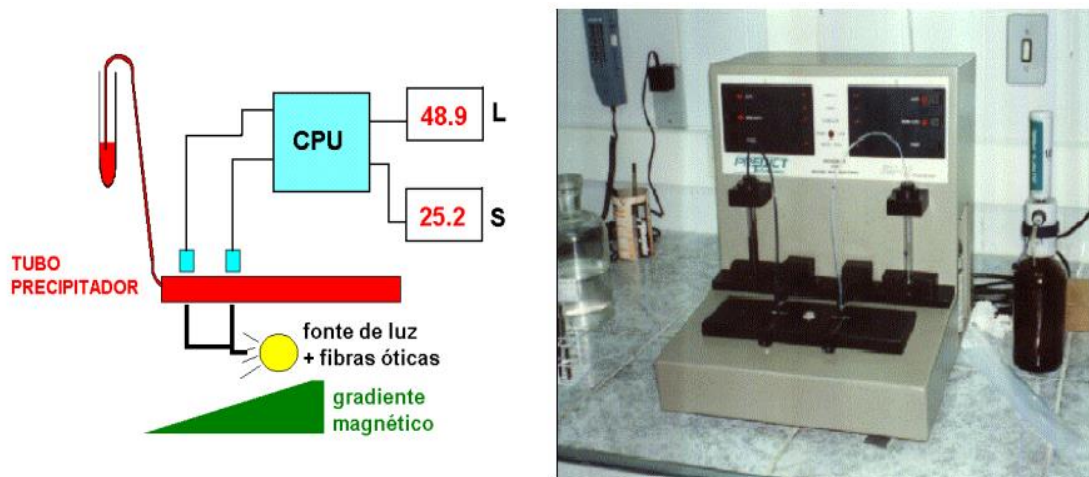


Figura 6 - Ferrógrafo Quantitativo. Fonte: Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas, 2002, p. 117.

Do mesmo modo que o ferrograma, as partículas atraídas são ordenadas por tamanho, encontrando-se partículas maiores logo no início do tubo precipitador.

O tubo precipitador é dividido em duas regiões, onde na primeira ficam depositadas partículas maiores que 5 μm , denominadas partículas grandes (L), e na segunda são encontradas partículas menores que 5 μm , denominadas partículas pequenas (S) (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002).

A unidade utilizada na ferrografia quantitativa é exclusiva e arbitrada. Para 50% da área do tubo coberta por partículas foi arbitrado o número 100, adimensional. A leitura fornecida pelo instrumento é diretamente proporcional à quantidade de partículas existentes na amostra (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002, p. 117).

De acordo com Kardec, Nascif e Baroni (2002), o manuseio das partículas L e S encontradas na amostra, permitem várias interpretações, tais como:

$$\text{Concentração total de partículas} = L + S$$

$$\text{Modo de desgaste (PLP)} = (L - S) / (L + S) \times 100$$

$$\text{Índice de severidade (IS)} = (L^2 - S^2) / \text{diluição}^2$$

O PLP contribui para a interpretação da análise quantitativa e deve ser utilizado em conjunto com o valor da $L + S$, pois isoladamente não é possível determinar parâmetros para avaliação. O motivo de serem usados em conjunto é de haver casos em que o valor de $L + S$ se encontra baixo com um PLP alto, e vice-versa (FERROGRAFIA...).

Um exemplo de $L + S$ baixo com PLP alto seria as máquinas sujeitas à contaminação por ferrugem.

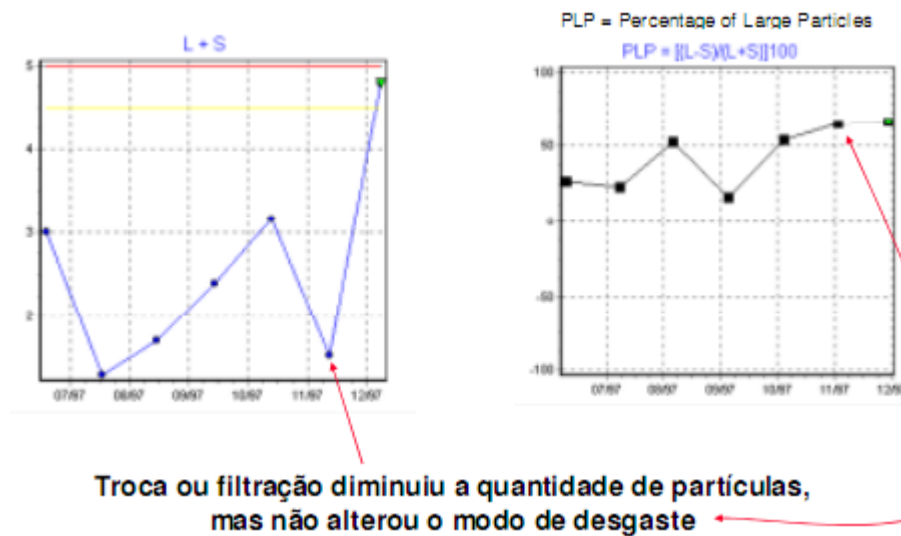


Figura 7 - Exemplo de L + S baixo com PLP alto. Fonte: FERROGRAFIA: Perguntas mais frequentes, f. 3.

Os resultados obtidos com o exame quantitativo são utilizados principalmente em gráficos de análise de tendências, e é indicado tecnicamente que os exames quantitativos sejam realizados antes do exame analítico, sendo o exame analítico executado somente quando o nível de alerta da análise quantitativa for diagnosticada, buscando então a real causa do problema (FERROGRAFIA...).

4.4 Determinação do nível de alerta da máquina

Reforçando a idéia de que não existem máquinas iguais, a determinação do nível de alerta é feita para cada tipo máquina que se deseja monitorar, e o mesmo é apenas determinado para a concentração total de partículas. O nível de alerta da concentração total de partículas é calculado estatisticamente utilizando-se de várias amostras da mesma máquina (FERROGRAFIA...).

“Assim como em outras técnicas de Manutenção Preditiva, os primeiros exames são utilizados na determinação da referência das máquinas (base line)” (BARONI; GOMES, f. 7).

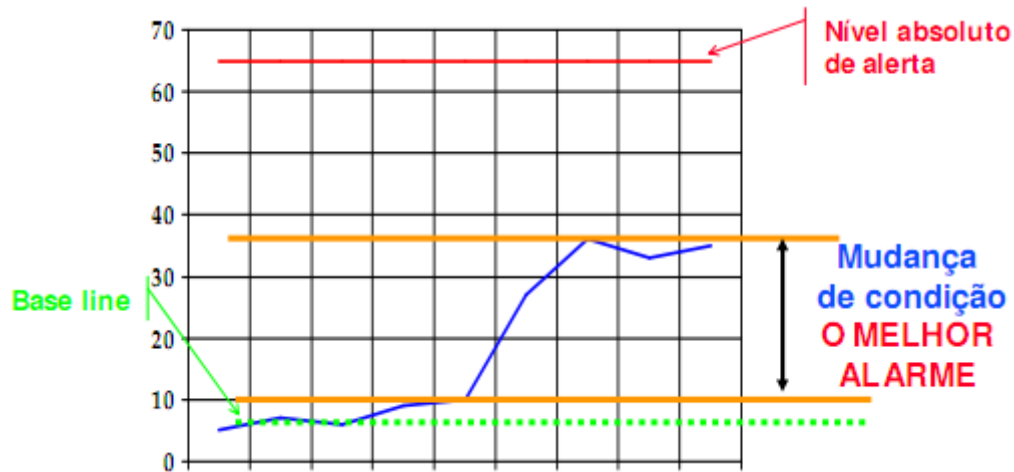


Figura 8 - Gráfico de determinação do nível de alerta. Fonte: FERROGRAFIA: Perguntas mais frequentes, f. 4.

4.5 Aplicações da técnica ferrográfica

De acordo com Kardec, Nascif e Baroni (2002, p. 120) “a técnica ferrográfica vem sendo utilizada em máquinas para os mais variados tipos e aplicações [...]”, e algumas condições básicas devem ser consideradas em sua aplicação, como:

- a) existência de óleo lubrificante ou graxa na máquina;
- b) possibilidade de coleta da amostra, preferencialmente com a máquina em operação;
- c) possibilidade de coleta da amostra em partes da máquina com a menor interferência possível de contaminação.

4.5.1 Avaliação da máquina para aplicação da técnica

De acordo com o material Ferrografia..., para que a técnica seja executada com eficiência é preciso que todos os dados das máquinas sejam fornecidos, como as características construtivas da máquina, tais como engrenagens, mancais, etc., e dados que trazem influência no comportamento dinâmico da unidade, como a temperatura, velocidade, carga, ocorrência de alguma intervenção, reapertos, reparos, etc.

E segundo o mesmo além das características construtivas e ambientais da máquina, as informações mínimas exigidas devem estar contidas no formulário ou etiqueta que deve seguir junto com a amostra.


	Empresa: _____
	Data da coleta : ___ / ___ / ___ Horas da máq.: _____
Tribolab	Nome da máquina e TAG: _____
Ponto de coleta: _____	
[] Em operação [] Foi parada para coleta por _____ minutos	
[] Já estava parada há _____ pelos motivos anexos	
[] Operando normalmente [] Há problemas descritos no anexo	
[] Caixa de engrenagens [] Compressor tipo: _____	
[] Sist. hidr. comum [] Sist. hidr. delicado (servo /proporcionais)	
[] Motor a explosão (Combustível: _____)	
[] Turbina a vapor [] Turbina a gás [] Turbina outros _____	
[] Outros: _____	
Lubrificante (nome comercial): _____	
Volume: _____ Troca: ___ / ___ / ___ Horas de uso: _____	
[] Nunca foi tratado [] Reposições de _____ litros em ___ / ___ / ___	
Em ___ / ___ / ___ foi: [] Filtrado [] Secado [] Outros: _____	
Exames de [] Rotina [] Emergência [] Especiais (vide anexo)	
Coletei pelo método oficial. Estou fornecendo todo o histórico de manut. / lubrificação e características construtivas e operacionais da máquina.	Coletado por (Nome legível): _____

Figura 9 - Modelo de etiqueta. Fonte: FERROGRAFIA: Perguntas mais frequentes, f. 5.

4.5.2 Escolha da máquina a ser monitorada

“As mais variadas aplicações e ramos de atividade se beneficiam da ferrografia” (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002, p. 120). E de acordo com Baroni e Gomes devem ser levados em conta alguns fatores importantes na determinação da máquina a ser monitorada, como:

- custo, ou seja, a importância da máquina no processo produtivo se apresentam dificuldades na manutenção ou cujo equipamento implica em perdas de matéria prima de preço elevado;
- segurança, ou seja, locais onde a parada ou quebra implicam em risco ao patrimônio, risco ao ser humano ou meio ambiente;
- qualidade, ou seja, cuja parada, quebra ou perda de performance afeta a qualidade do produto.

Alguns exemplos de aplicações e ramos de atividades que se beneficiam com a técnica (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002, p. 120):

- a) caixas de engrenagem (redutores e multiplicadores);
- b) máquinas alternativas (compressores e motores a explosão, motores hidráulicos);
- c) turbomáquinas (turbinas e turbocompressores);
- d) máquinas rotativas (compressores de parafusos e motores elétricos);
- e) circuitos hidráulicos de potência ou de controle;
- f) mancais diversos (rolamento ou deslizamento);
- g) transformadores elétricos, como técnica de apoio à cromatografia.

4.6 Interpretação dos laudos

A Tribolab forneceu dois laudos para o estudo da técnica, e no primeiro (figura 10) considerado de status normal podemos perceber que a quantidade de partículas se encontra de forma contínua, sem grandes alterações, de acordo com as características de funcionamento da máquina não necessitou de um exame mais detalhado, como o analítico.

Já no segundo relatório (figura 11), considerado de status crítico, percebemos a alteração significativa de concentração de partículas em um pequeno intervalo de tempo ultrapassando o nível de alerta, e a necessidade da execução da técnica analítica, onde partículas de esfoliação, oxidação, corrosão, gel entre outras foram encontradas exigindo a intervenção da manutenção para a análise dos possíveis problemas.

Podemos ter também os status aceitável e em alerta entre os dois citados, e a monitoração do equipamento prevalece diante delas, tendo um maior cuidado quando dado como em alerta.



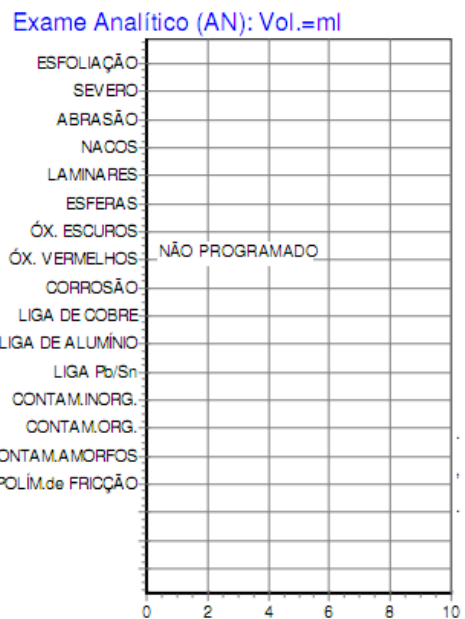
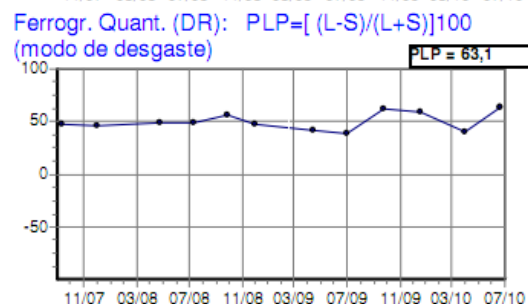
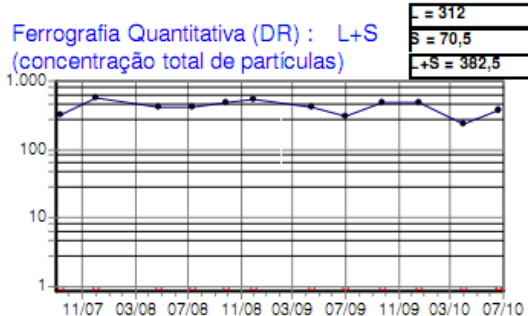
Tribolab

RELATÓRIO DE EXAME nr. 1008 - 1269		NORMAL
Código Tribolab...	208302.000003.000001	Data da coleta: 21/06/2010
Máquina.....	T1 - ESTEIRA DA EXTRAÇÃO	
Ponto de coleta..	REDUTOR/DRENO	Recebido: 12/08/2010 Exec.: 23/08/2010
CONCLUSÕES: Ref.: Lub:XXXX MARCA OMITIDA XXXXX [X]Normal []Aceitável []Alerta [] Crítica Considerando-se a amostra como representativa, os resultados sugerem condição adequada. Não há ação de manutenção especial a tomar além de manter o programa de ensaios.		
Quím. Marcia T. F. Zampieri Relatório eletrônico, dispensa assinatura conf. normas atuais. Para prova de autenticidade contactar o laboratório com o nr. do relatório.		Laboratório da Tribolab - SP / Brasil

INFORMAÇÕES ENVIADAS PELO CLIENTE / OBSERVAÇÕES REALIZADAS NO EXAME:

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.
 *Nenhum histórico (ocorrências) foi informado pelo cliente.

Resultados espectrométricos: Fe= 13ppm, Cr= 0ppm, Pb= 1ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm, Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 8ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 1ppm, Ba= 0ppm, P= 183ppm, Zn= 1ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm. Arredond. conf. norma (Ex: 0,2->0). Dentro do esperado.
 Visc. @ 40°C= 318,9 cSt. Água= < 0,1%. Dentro do esperado.
 Resultados ferrográficos quantitativos estão adequados.



Na Ferrografia, assim como na Análise de Vibrações Espectral, não há limites absolutos e sim análise de tendências.
 Unidades ferrográficas próprias da técnica, não convertíveis para outras unidades: L= Partículas > 5µm S= Partículas < 5µm
 A ASTM D6224 reconhece nossos métodos de ensaios ferrográficos por sermos desenvolvedores desta técnica.

Figura 10 - Teste com status normal. Fonte: Tribolab, [http:// www.tribolab.com.br](http://www.tribolab.com.br)



Tribolab

RELATÓRIO DE EXAME nr. 8888 - 253

Código Tribolab... 999999.000021.000001 **CRÍTICA**

Máquina..... XX-XX-041 - ACIONAMENTO DO XXXX Data da coleta: 28/07/2010

Ponto de coleta.. REDUTOR PRINCIPAL - VÁLVULA NO RETORNO Recebido: 28/07/2010 Exec.: 02/08/2010

CONCLUSÕES: Ref.: Lub:XXXX MARCA OMITIDA XXXXX []Normal []Aceitável []Alerta [X] Crítica

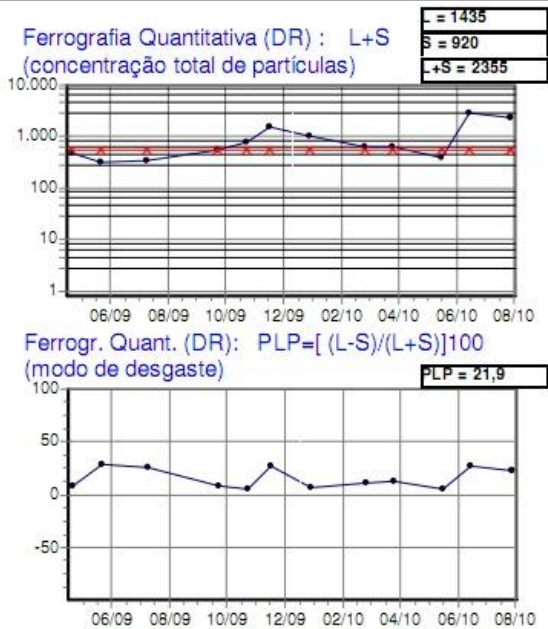
Considerando-se a amostra como representativa, os resultados ainda estão inadequados. Vemos que a centrifugação e filtração foram insuficientes. Além de danos nos rolamentos, agora temos precipitação de aditivos, ferrugem e corrosão. A parada deverá prever correção de geometria e inspeção das engrenagens e rolamentos, incluindo as tampas e retentores dos mancais. As finas partículas (<0,1µm) não serão removidas nem com filtro absoluto. Para proteção da máquina até a parada, repetir a centrifugação por 3 a 4 vezes o tempo utilizado e não permitir que o termo-vácuo subcontratado exceda 70 °C, conforme já antecipamos em contato telefônico. ***** Este é um exemplo real. Os dados foram omitidos (XXXX) para proteger identificação do cliente. *****

Eng. Baroni / Quím. Marcia Laboratório da Tribolab - SP / Brasil

Relatório eletrônico, dispensa assinatura conf. normas atuais. Para prova de autenticidade contactar o laboratório com o nr. do relatório.

INFORMAÇÕES ENVIADAS PELO CLIENTE / OBSERVAÇÕES REALIZADAS NO EXAME:

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente. *Cliente informa: Óleo trocado em 28/03/09 e filtrado em 14/07/10. Repos. de 280 l em 15/07/10. Foi efetuada centrifugação do óleo para remover água, paralelamente à filtragem. Está programada intervenção mecânica. Resultados espectrométricos:*Fe= 308ppm, Cr= 2ppm, Pb= 2ppm, Cu= 17ppm, Sn= 0ppm, Al= 1ppm, Ni= 1ppm, Ag= 0ppm, Si= 4ppm, B= 0ppm, Na= 1ppm, Mg= 3ppm, Ca= 2ppm, Ba= 6ppm, P= 155ppm, Zn= 19ppm, Mo= 1ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm. Arredond. conf. norma (Ex: 0,2->0). * Irregular. Espectr.Grandes Partículas(2 a 250µm):*Fe= 2971ppm, Cr= 18ppm, Pb= 12ppm, Cu= 176ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm, Ni= 4ppm, Ag= 0ppm, Si= 23ppm, B= 0ppm, Na= 7ppm, Mo= 1ppm, Ti= 0ppm. * Irregular. Visc. @ 40°C= 210,7 cSt. Normal. *TAN = 0,18 mgKOH/g. Decaindo. *Água= 0,22%. Melhor. Pela ferrografia analítica ainda há desalinhamento mecânico (aço de rolamentos), corrosão < 0,1µm e gel/borra. Pesquisa por Infravermelho:Oxid.=6,03; Sulf.=12,58; Nitr.=3,74; Fulligem=0,02 normais, mas queda de aditivos.



Na Ferrografia, assim como na Análise de Vibrações Espectral, não há limites absolutos e sim análise de tendências. Unidades ferrográficas próprias da técnica, não convertíveis para outras unidades: L= Partículas > 5µm S= Partículas < 5µm A ASTM D6224 reconhece nossos métodos de ensaios ferrográficos por sermos desenvolvedores desta técnica.

Figura 11 - Teste com status crítico. Fonte: Tribolab, [http:// www.tribolab.com.br](http://www.tribolab.com.br)

5.0 CASOS HISTÓRICOS DA APLICAÇÃO E MONITORAMENTO ATRAVÉS DA TÉCNICA FERROGRÁFICA

5.1 Caso 01 – Redutor de velocidade de uso em equipamentos ferroviários

A análise feita no equipamento indicou alta concentração de partículas de esfoliação, podendo ser a possível causa pela baixa viscosidade do lubrificante ISO 150. Após a tentativa de troca do lubrificante para um com a viscosidade superior, o ISO 220, pode-se notar que o desgaste diminuiu, afirmando que a causa do desgaste era a baixa viscosidade do lubrificante aplicado no redutor (BARONI; GOMES).

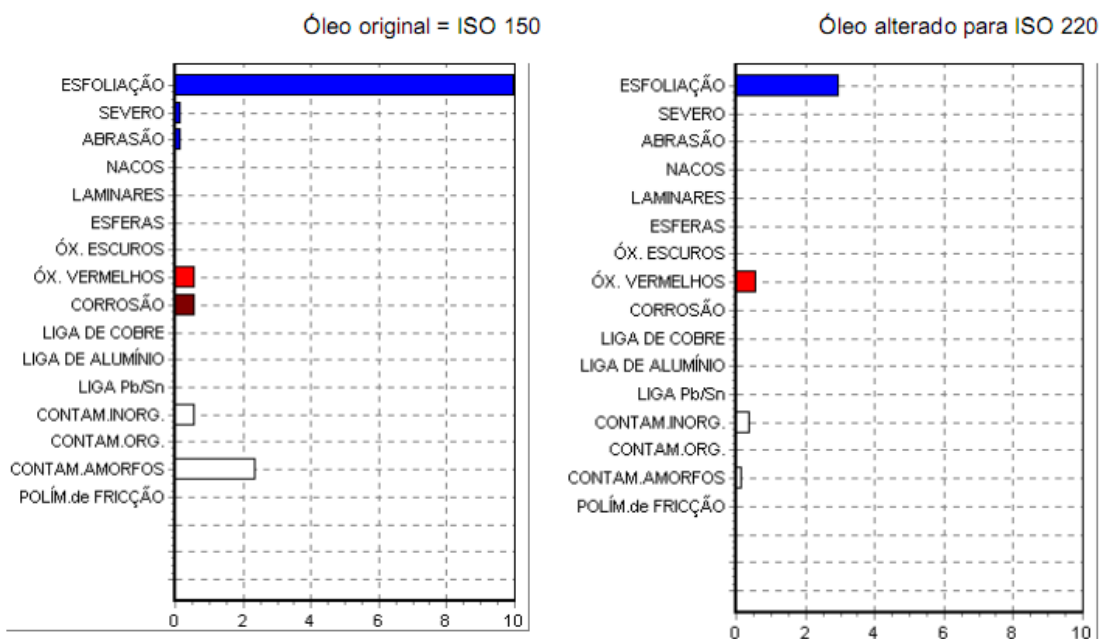


Figura 12 - Efeito da viscosidade. Fonte: Ferrografia, controlando o desgaste de máquina, f. 11.

5.2 Caso 02 – Compressor de ar tipo parafuso

O monitoramento permitiu que fosse atrasada a intervenção da manutenção no equipamento onde estava programada para 10.000 horas de funcionamento, e permitiu um aumento de 16.000 horas, totalizando 26.000 horas de funcionamento antes da intervenção,

tendo um aumento considerável da vida útil do equipamento e ocorrendo também à redução de custo. Apesar da unidade já vir apresentando partículas L+S acima do nível de alerta a parada para manutenção somente ocorreu quando houve um aumento considerável na concentração de partículas, indo até o limite máximo de seu funcionamento, e a desmontagem do equipamento confirmou problemas com o rolamento e dentes de engrenagem (BARONI; GOMES).

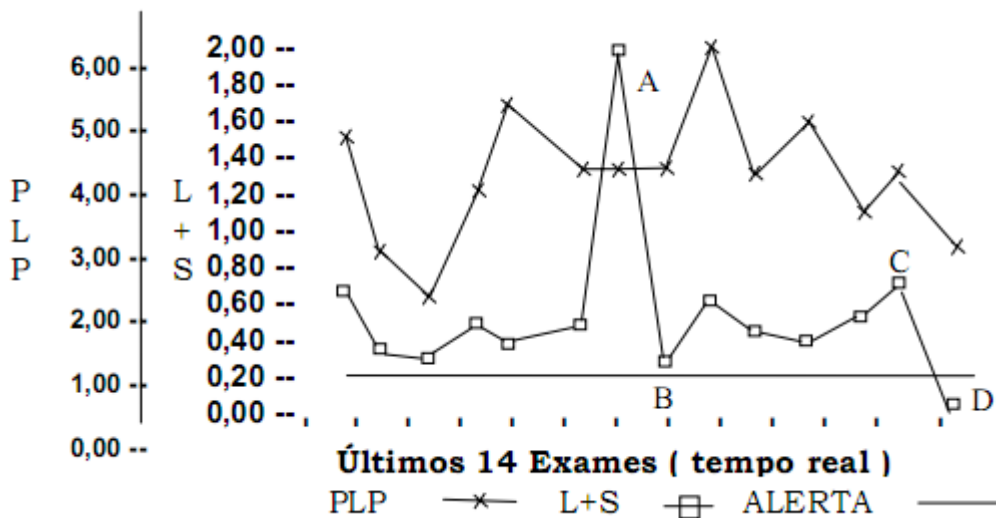


Figura 13 - Prolongamento da vida útil. Fonte: Ferrografia, controlando o desgaste de máquina, f. 12.

Na figura 13, o gráfico apresenta o resultado da intervenção da equipe para fazer a manutenção no compressor. Podemos ver que no ponto “A” o resultado da análise encontra-se bem acima do nível de alerta, indicando uma ocorrência de falha no rolamento e dentes de engrenagem. Os responsáveis pela manutenção trocaram o lubrificante do equipamento a fim de tentar resolver o problema, e as partículas decaíram consideravelmente no ponto “B”. Apesar da troca do lubrificante o desgaste continuou evoluindo de forma crescente no ponto “C” até que foi feita a intervenção e o reparo da máquina. A provável causa das partículas terem decaído na análise do ponto “B” foi pela troca do lubrificante, diminuindo assim as partículas de desgaste.

Após a intervenção e reparo da máquina percebemos que no ponto “D” o resultado da análise se mostrou normal e abaixo do nível de alerta, indicando assim um funcionamento normal do compressor (BARONI; GOMES).

5.3 Caso 03 – Compressor frigorífico

O equipamento foi monitorado e cumpridas aproximadamente metade das horas programadas para a intervenção o mesmo já apresentou desgaste severo e de abrasão em aço, em metal patente e em bronze indicando a necessidade da intervenção. Após a intervenção da manutenção o ferrograma se mostrou em condições normais novamente (BARONI; GOMES).

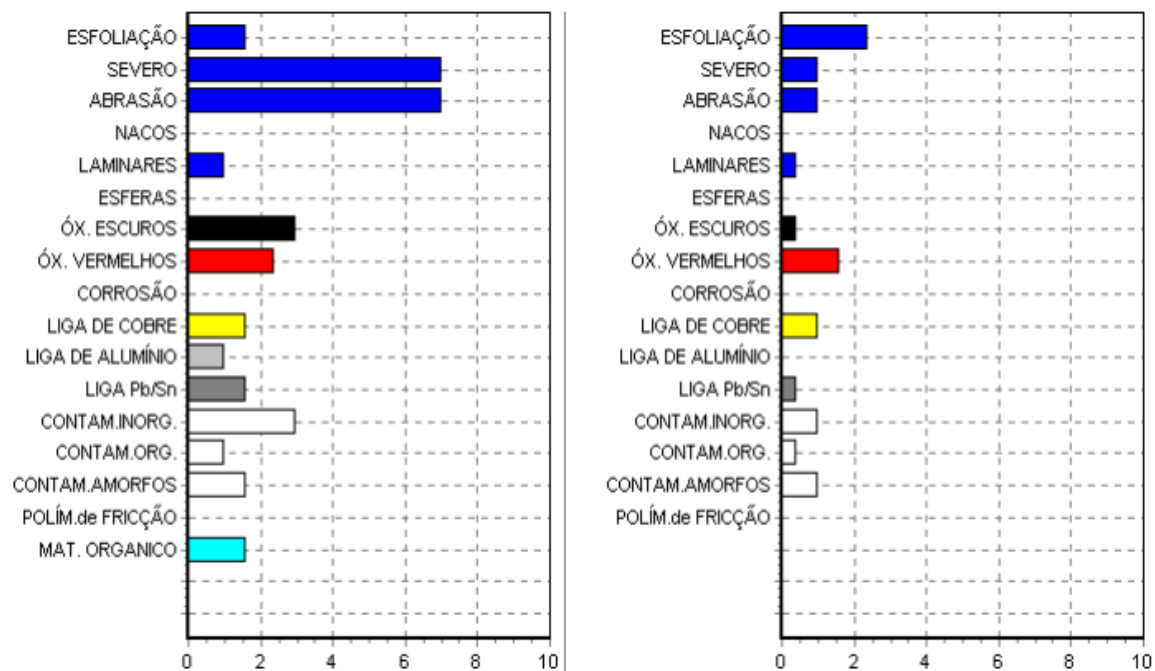


Figura 14 - Indicação de defeito. Fonte: Ferrografia, controlando o desgaste de máquina, f. 12.

5.4 Caso 04 – Regulador de velocidade de turbina hidráulica

No último caso de monitoramento através da técnica ferrográfica, foi monitorado um regulador de velocidade de turbina hidráulica para geração de energia elétrica e apesar dos ensaios físico-químicos (ensaios de viscosidade, acidez, espectrometria por infravermelho e por absorção atômica, insolúveis, contagem de partículas, indução à oxidação, etc.) feitos na carga de óleo em uso terem se mostrado eficientes para a operação do equipamento, a unidade sofria interrupções por travamento do conjunto eletro-hidráulico de regulação. Após feito os exames ferrográficos, a análise analítica apresentou a presença de gel resultante da oxidação do óleo, podendo ser a possível causa do problema no equipamento (BARONI; GOMES).

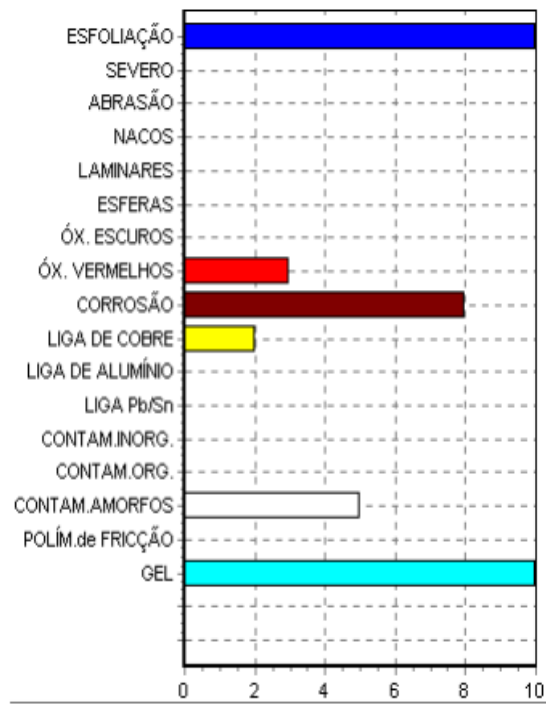


Figura 15 - Limitação de ensaios convencionais em óleo lubrificante. Fonte: Ferrografia, controlando o desgaste de máquina, f. 13.

6 CONCLUSÃO

Ao concluir o presente estudo pode-se perceber a importância de se utilizar uma técnica preditiva como a ferrografia para monitorar os equipamentos de total importância no processo produtivo e compreender as vantagens de implantação da técnica dentro das indústrias que buscam efetividade em seus processos produtivos.

As indústrias estão cada vez mais preocupadas em se desenvolverem e ocuparem espaço no mercado, e para que isso ocorra é preciso adotar novos métodos e conceitos de trabalho, se despreendendo dos antigos paradigmas da indústria, e não preocupando somente na quantidade de produtos produzidos e também com a importância de seus equipamentos e técnicas de monitoramento dos mesmos, para que além de produzirem com qualidade consigam atingir ao máximo o tempo de sua vida útil.

Com base nos dados, laudos e referências consultadas fica evidente que o melhor caminho para o departamento de manutenção é adotar um programa de manutenção preditiva e estabelecer padrões de monitoramento dos equipamentos que julgam necessários de acordo com as características da técnica ferrográfica e importância que os mesmos tem no processo, para evitar gastos e paradas desnecessárias.

Portanto, é indispensável salientar que a técnica ferrográfica aplicada de forma funcional dentro de uma indústria que busca o desenvolvimento contínuo é de total valia de acordo com os casos históricos aqui presentes, e tem como particularidade quantificar e analisar as partículas de desgastes presentes através de suas características e do equipamento para aproveitar ao máximo o funcionamento da máquina e evitar intervenções desnecessárias e não programadas que possam prejudicar o processo produtivo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade, 1994.

BARONI, Tarcísio; GOMES, Guilherme F. **Ferrografia, controlando o desgaste de máquinas**. São Paulo: TRIBOLAB.

BRANCO FILHO, Gil. **A organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

FERROGRAFIA: **Perguntas mais frequentes**. São Paulo: TRIBOLAB.

KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio; BARONI, Tarcísio. **Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

NEPOMUCENO, L.X. **Técnicas de Manutenção Preditiva**. São Paulo: Edgar Blucher, 1989. v. 1.

PINTO, A. K.; XAVIER J. N. **Manutenção Função Estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

TRIBOLAB. **Histórico da ferrografia no Brasil**. Disponível em: <http://www.tribolab.com.br>
Acesso em 29/10/2011

VIANA, Herbert R. G. **PCM, Planejamento e Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.