

Manutenção industrial

Manutenção industrial

© SENAI-SP, 2006

Trabalho elaborado pelas CFPs 5.03, 5.68 e 6.02 e editorado por Meios Educacionais da Gerência de Educação da Diretoria Técnica do SENAI-SP para o Curso Técnico de Manutenção Eletromecânica.

Coordenação técnica	Airton Almeida de Moraes (GED)
Elaboração	Fernando Rigolon (5.68) Milton Antônio Scarpelin (5.03) Vitório Moreira Yugulis (6.02)
Coordenação editorial	Gilvan Lima da Silva (GED)

SENAI Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
Departamento Regional de São Paulo
Av. Paulista, 1.313 - Cerqueira César
São Paulo - SP
CEP 01311-923

Telefone (0XX11) 3146-7000
Telefax (0XX11) 3146-7230
SENAI on-line 0800-55-1000

E-mail senai@sp.senai.br
Home page <http://www.sp.senai.br>

Sumário

Fundamentos da manutenção preditiva	01
• Classificação geral das técnicas de monitoramento	01
• Execução da manutenção preditiva	04
• Análise da tendência da falha	05
Técnica de análise da vibração	09
• Vibração mecânica	09
• Tipos de vibração	12
• Medições de vibração	14
• Parâmetros do sinal de vibração e unidades de medição	19
• Análise espectral das principais anomalias	22
• Mais alguns parâmetros para medição e análise de vibrações	24
• Captação dos sinais de vibração com transdutores	26
• Analisadores	27
Termômetro	35
• Termômetro com infra-vermelho	35
• Aplicação dos termômetros com infra-vermelho	36
Aplicação da termografia	37
• Termografia	38
• Aparelhos de medição	41
• termovisores	42
• Aplicação da termografia em sistemas elétricos	42
• Planejamento das inspeções termográficas	43
Ultra-som	47
• E o que é ultra-som?	47
• Aplicando o ultra-som	48
• O que é transdutor?	48
• Acoplante	49
Realizando o ensaio de ultra-som	53
• Técnicas de ensaio	53

• Equipamento de ensaio por ultra-som	57
• Medição de espessura com o ultra-som	59
Análise de óleos lubrificantes	61
• Coletas de amostras de lubrificantes	61
Análise de lubrificantes por meio da técnica ferrográfica	65
• Conceito da ferrografia	65
• Origem da ferrografia	65
• A técnica ferrográfica	66
• Funcionamento do ferrógrafo	67
• Ferrograma	68
• Ferrografia quantitativa	69
• Ferrografia analítica	72
• Cronograma de monitoramento	73
• Comparação com outras técnicas	73
• Tipos de máquinas	76
• Casos históricos	77
Alinhamentos	81
• Alinhamentos	81
Alinhamento a laser	81
Cuidados especiais de alinhamento	89
Análise por sintomas	91
• Tomada de decisões	91
• Análise de sintomas	92
• Exemplos de aplicação	94
Tribologia	97
• Atrito	98
• Lubrificação	99
• Especificação de lubrificantes	101
• Itens de estocagem	103
• Sistemática de lubrificação	105
• Codificação convencional	107
• Controle	108
• Análise de óleos	109
• Análises físico-química	111
• Ensaio utilizados, descrição e interpretação	111
• Análise morfológica de partículas e de desgaste	115
• Custo-benefício	117
Prestação de serviços de manutenção pró-ativa	119

• Análise de contrato	119
• Análise de relatório	120
• Desenvolvimento de fornecedores	120
• Avaliação do desempenho	120
Abordagem estatística da falha	123
• Histograma	125
• Funções de densidade de probabilidade	125
• Taxa de falha em idade determinada	127
• O perfil de falha durante a vida de um equipamento	128
• Disponibilidade de instalações	129
Manutenção baseada na confiabilidade	131
• Processo de manutenção baseada na confiabilidade	131
• Fluxograma de decisão	134
• Risco	136
• Etapas de implantação	138
• Funções e padrão de desempenho	141
• Estudo de falhas	141
• Tarefas	146
• Planilhas	147
• Sistema de Informações	150
Referências	153

Fundamentos da manutenção preditiva

Uma empresa vinha desenvolvendo de modo satisfatório um programa de manutenção, porém, o relatório final de produção indicava a possibilidade de aperfeiçoamentos no processo. Estudos posteriores revelaram que, para aperfeiçoar o processo com ganhos de produção, era preciso, entre outros procedimentos, incluir a **manutenção preditiva** no programa de manutenção.

Após muitas reuniões entre dirigentes, gerentes, encarregados, supervisores e operários, chegou-se ao consenso de que a empresa, para instalar um programa de manutenção preditiva, precisaria, antes de qualquer coisa, capacitar uma equipe em manutenção preditiva e orientar todo o pessoal por meio de treinamentos específicos.

Classificação geral das técnicas de monitoramento

Já vimos que a manutenção preditiva é aquela que indica a necessidade de intervenção com base no estado do equipamento. A avaliação do estado do equipamento se dá através de medição, acompanhamento ou monitoração de parâmetros.

Esse acompanhamento pode ser feito de três formas:

- Acompanhamento ou monitoração subjetiva.
- Acompanhamento ou monitoração objetiva.
- Monitoração contínua.

Monitoração subjetiva

Variáveis como temperatura, vibração, ruído e folgas já são acompanhadas há muitos anos pelo pessoal da manutenção, independente da existência de instrumentos.

O ruído e o tato podem nos indicar o estado de algumas peças ou a existência de peças frouxas.

Esses procedimentos fazem parte da monitoração da condição do equipamento, e serão tanto mais confiáveis quanto mais experientes sejam os profissionais de manutenção. Mesmo que a experiência propicie uma identificação razoável nesse tipo de verificação, ela não deve ser adotada como base para decisão por ser extremamente subjetiva. Cada pessoa terá uma opinião. A temperatura de uma caixa de mancal pode estar boa para um e estar muito alta para outro. Apesar disso, o uso dos sentidos pelo pessoal de manutenção deve ser incentivado.

Visão, Audição, tato, olfato. Faça uso, mas seja cauteloso. Esses “instrumentos” não são substituíveis. Certifique-se das condições de segurança antes de usar seus sentidos.

Monitoração objetiva

A monitoração, ou o acompanhamento objetivo, é feita com base em medições utilizando equipamentos ou instrumentos especiais.

É objetiva por:

- Fornecer um valor de medição do parâmetro que está sendo acompanhado.
- Ser o valor medido independente do operador do instrumento, desde que utilizado o mesmo procedimento.

Para utilização de qualquer meio de acompanhamento do estado de equipamentos por meio de instrumentos – monitoração objetiva – é fundamental que:

- O pessoal que opera os instrumentos seja treinado e habilitado para tal.
- Os instrumentos estejam calibrados.
- Haja pessoal capaz de interpretar os dados coletados e emitir diagnóstico.

E, finalmente, tão ou mais importante do que os três itens relacionados é que a média e a alta gerência confiem no diagnóstico de seus técnicos.

Monitoração contínua

A monitoração contínua, que é também um acompanhamento objetivo, foi inicialmente adotada em situações onde o tempo de desenvolvimento do defeito era muito curto e em equipamentos de alta responsabilidade. Isso significa uma excelente proteção desde que, usualmente, a monitoração contínua venha associada a dispositivos que,

em um primeiro momento, alarmam e em seguida promovem a parada ou desligamento do equipamento uma vez atingido o valor limite estipulado. Como os sistemas de monitoração contínua tinham um preço muito elevado, somente na situação descrita sua aquisição era justificada.

Com o desenvolvimento da eletrônica e de sistemas digitais, a oferta de sistemas de monitoração teve seu leque de aplicações ampliado e o preço final tem caído. Isso vem permitindo, também a utilização de sistemas de monitoração à distância. Um exemplo disso é a monitoração dos grupos geradores nas usinas hidrelétricas. O sistema instalado nas máquinas na usina fornece dados para a usina e ao mesmo tempo para os terminais instalados na sede da empresa.

É possível monitorar variáveis típicas de processo como densidade, vazão, pressão, etc. e variáveis relacionadas mais diretamente com os equipamentos, como vibração, temperatura de mancais, temperatura do enrolamento de motores elétricos, etc.

Outros aspectos importantes da monitoração contínua:

- Independe de pessoal
- Efetua monitoração realmente contínua, o que não é razoável de ser conseguido com pessoas operando instrumentos.
- Pode enviar os dados em tempo real para unidades lógicas de processamento ou computadores com programas especialistas.
- Pode ser configurada de acordo com as necessidades do cliente, fornecendo redundância onde se exija alta confiabilidade e saídas para acoplamento de instrumentos e processadores visando análises mais aprofundadas.
- Alguns fenômenos, particularmente na área de equipamentos rotativos, somente podem ser detectados através do acompanhamento permanente de determinadas variáveis.
- Alguns dados só podem ser levantados em situação de parada ou partida das máquinas, por serem muito rápidos ou por ocorrerem em horários e condições que inviabilizam o levantamento manual de dados.
- Sistemas de monitoração contínua são adequados para verificação de transientes, o que não ocorre com coletores manuais.
- A existência de sistemas de monitoração é fator de economia em relação a prêmios de seguros e tempo de campanha.

No local mais apropriado para medição é instalado um sensor ou captor que pode ser de contato ou não, dependendo do tipo de medição. Esse sensor está ligado a um

transdutor que faz a decodificação do sinal para que ele possa ser traduzido em valores no indicador instalado no painel.

São comumente empregados os seguintes tipos de instalação:

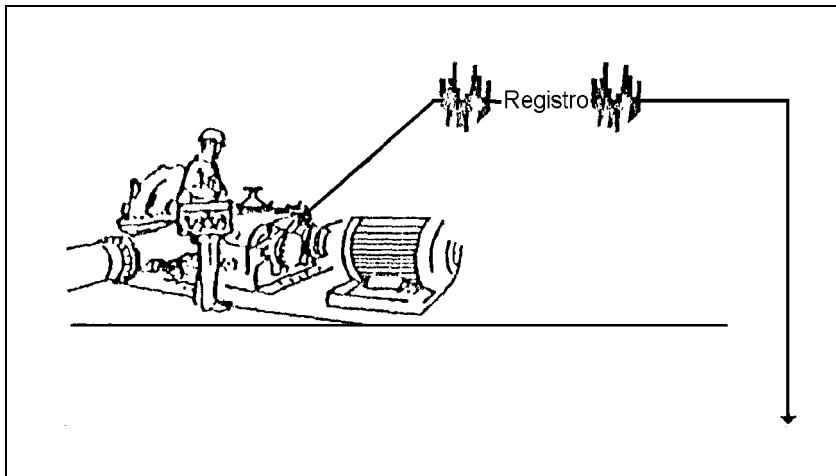
- No campo. Todo o sistema, desde os sensores até o painel, é instalado no campo, normalmente ao lado das máquinas ou instalações.
- Painel na casa de controle local, quando a indústria utiliza o conceito de casas de controles por unidades operacionais ou conjunto fabril.
- Painel ou dados para a casa de controle central, principalmente quando a planta usa sistema centralizado de controle como SDCD – Sistema Digital de Controle Distribuído.
- Painel na unidade operacional, em uma das três opções acima, é dado em locais remotos, sede da empresa, centro de controle etc. distantes fisicamente da planta.
- Os sinais de condição mecânica, elétrica ou de processos transmitidos pelos sensores são levados até os transmissores, que são capazes de realizar cálculos complexos, detecção de alarme e verificação de erros. Desse modo, entradas de pressão, temperatura, rotação, fase, tensão, corrente elétrica, quando processadas, podem fornecer a potência, carga e eficiência volumétrica; comparar os resultados com dados previamente informados; verificar níveis de alarme e comunicar essas condições para PLC ou SDCD.

Execução da manutenção preditiva

Para ser executada, a manutenção preditiva exige a utilização de aparelhos adequados, capazes de registrar vários fenômenos, tais como:

- vibrações das máquinas;
- pressão;
- temperatura;
- desempenho;
- aceleração.

Com base no conhecimento e análise dos fenômenos, torna-se possível indicar, com antecedência, eventuais defeitos ou falhas nas máquinas e equipamentos.



A manutenção preditiva, após a análise dos fenômenos, adota dois procedimentos para atacar os problemas detectados: estabelece um diagnóstico e efetua uma análise de tendências.

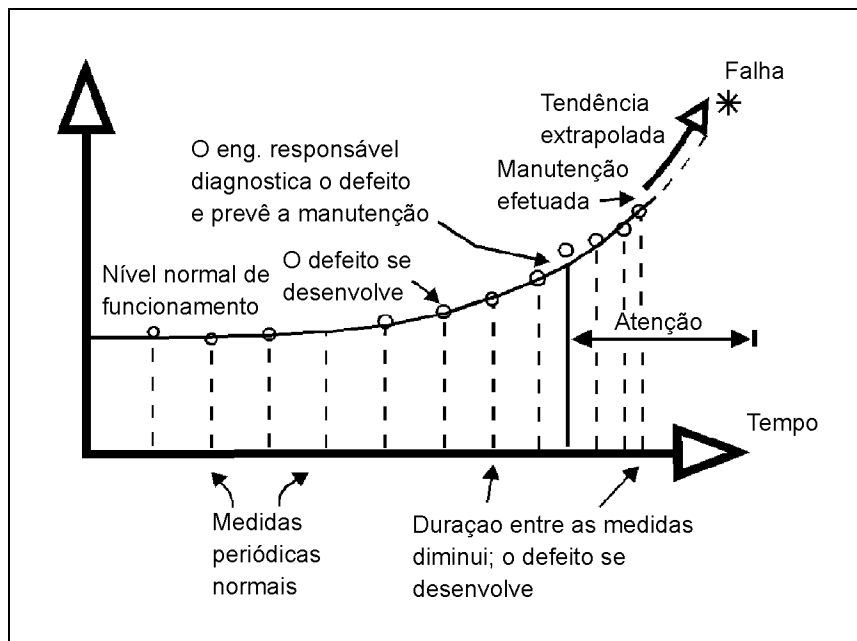
Diagnóstico

Detectada a irregularidade, o responsável terá o encargo de estabelecer, na medida do possível, um diagnóstico referente à origem e à gravidade do defeito constatado. Este diagnóstico deve ser feito antes de se programar o reparo.

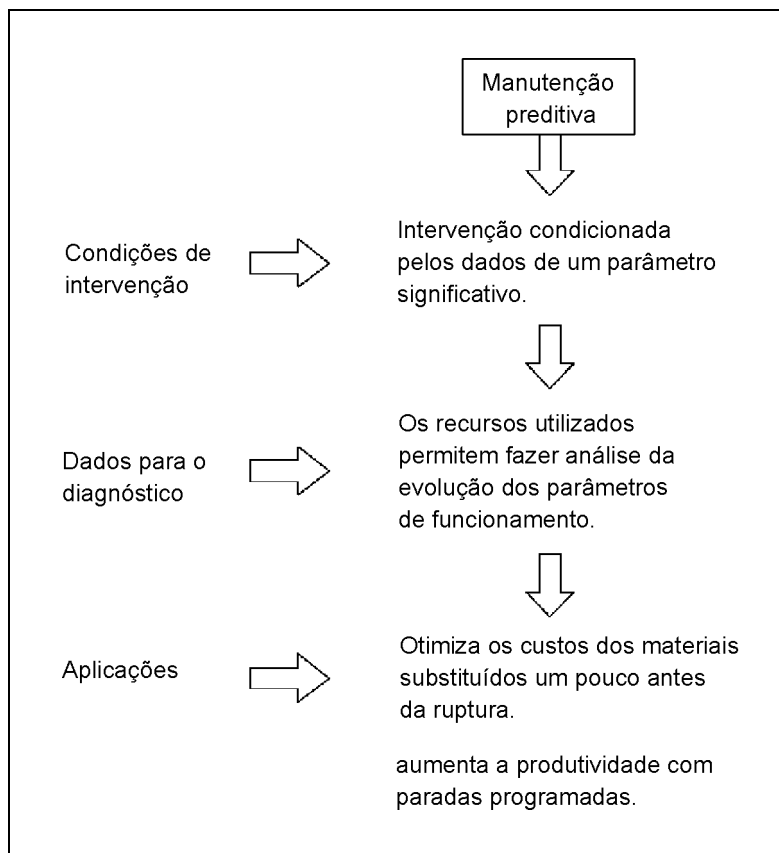
Análise da tendência da falha

A análise consiste em prever com antecedência a avaria ou a quebra, por meio de aparelhos que exercem vigilância constante predizendo a necessidade do reparo.

Graficamente temos:



O esquema a seguir resume o que foi discutido até o momento.



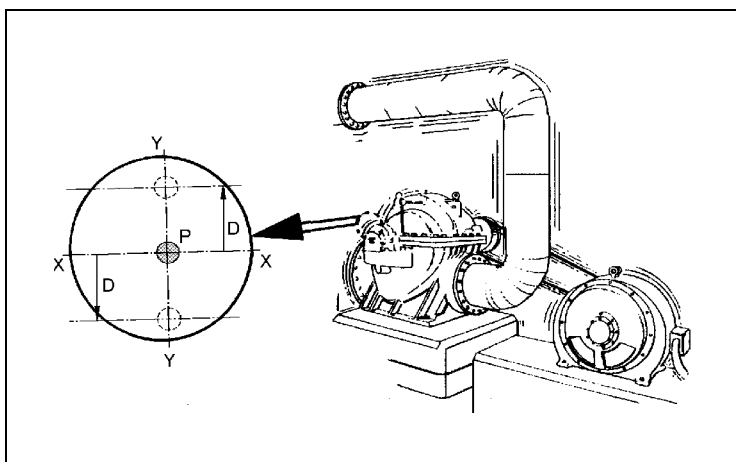
A manutenção preditiva, geralmente, adota vários métodos de investigação para poder intervir nas máquinas e equipamentos. Entre os vários métodos destacam-se os seguintes: estudo das vibrações; análise dos óleos; análise do estado das superfícies e análises estruturais de peças.

Técnica de análise da vibração

Vibração mecânica

Para compreender os fundamentos da análise de vibrações, será preciso compreender o que é vibração mecânica. Leia atentamente o que segue, orientando-se pela figura abaixo, que mostra um equipamento sujeito a vibrações.

Vibração mecânica é o movimento resultante da ação de uma força sobre uma partícula de massa.



No detalhe da figura acima, o ponto P, quando em repouso ou não estimulado pela força, localiza-se sobre o eixo x. Sendo estimulado por uma força, ele se moverá na direção do eixo y, entre duas posições limites, eqüidistantes de x, percorrendo a distância 2D, isto é, o ponto P realiza um movimento oscilatório sobre o eixo x.

Para que o movimento oscilatório do ponto P se constitua numa **vibração**, ele deverá percorrer a trajetória **2D**, denominada trajetória completa, ou ciclo, conhecida pelo nome de **período de oscilação**.

Deslocamento

De acordo com o detalhe mostrado na ilustração, podemos definir o deslocamento como a medida do grau de distanciamento instantâneo que experimenta o ponto P no espaço, em relação à sua posição de repouso sobre o eixo x. O ponto P alcança seu valor máximo D, de um e do outro lado do eixo x. Esse valor máximo de deslocamento é chamado de **amplitude** de deslocamento, que é medida em micrometro (μm).

Observação

$$1\mu\text{m} = 0,001\text{mm} = 10^{-3}\text{mm}$$

O ponto P realiza uma trajetória completa em um ciclo, denominado **período de movimento**, mais usualmente chamado **freqüência de vibração**.

Freqüência é a quantidade de vezes, por unidade de tempo, que um fenômeno se repete. No caso do ponto P, a freqüência é a quantidade de ciclos que ele realiza na unidade de tempo. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de freqüência recebe o nome de **hertz (Hz)**, que equivale a um ciclo por segundo.

Na literatura mecânica, é comum encontrarmos número de rotações por minuto e ciclos por minuto como unidades de freqüência. Essas unidades podem ser aceitas, considerando-se que o movimento de rotação do eixo é a causa, em última instância, da existência de vibrações em uma máquina, e que quando o eixo completa uma rotação, o ponto P descreverá um número inteiro de trajetórias completas ou ciclos.

Velocidade

O ponto P tem sua velocidade nula nas posições da amplitude máxima de deslocamento, e velocidade máxima quando passa pelo eixo x, que é a posição intermediária de sua trajetória. No SI, a unidade de velocidade é metros/segundo (m/s). No caso particular do ponto P, a velocidade é expressa em **mm/s**.

Aceleração

Como a velocidade do ponto P varia no decorrer do tempo, fica definida uma certa aceleração para ele.

A variação máxima da velocidade é alcançada pelo ponto P em um dos pontos extremos de sua trajetória, isto é, ao chegar à sua elongação máxima D. Nessas posições extremas, a velocidade não somente muda de valor absoluto, como também de sentido, já que neste ponto ocorre inversão do movimento.

A aceleração do ponto P será nula sobre o eixo x, pois sobre ele o ponto P estará com velocidade máxima.

Resumindo, o movimento vibratório fica definido pelas seguintes grandezas: deslocamento, velocidade, aceleração, amplitude e frequência.

Amplitude e frequência

A amplitude pode ser representada por 3 grandezas:

- **Deslocamento** microns/ mm
- **Velocidade** mm/s
- **Aceleração** mm/s² ou g

A frequência é número de vezes em que o movimento se repete em um determinado espaço de tempo. A frequência da vibração de Máquinas normalmente é medida em:

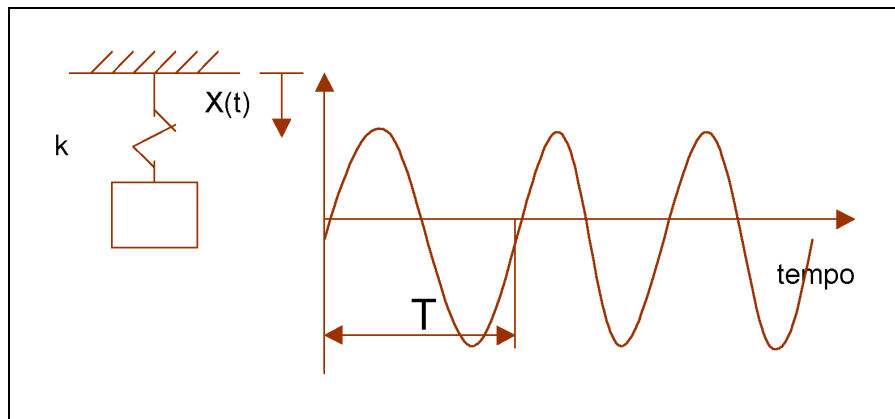
- Hz - Ciclos por segundo.
- CPM - Ciclos por minuto.

Segue abaixo os mecanismos de uma vibração.

Movimentos harmônicos

De acordo com a definição de vibração vista anteriormente, percebe-se que o processo vibratório pode ser traduzido matematicamente pela teoria dos Movimentos Harmônicos, que representam movimentos de “vai e vem” em torno de uma posição de equilíbrio.

Os movimentos harmônicos se repetem regularmente a intervalos de tempo iguais T, e por isso são denominados movimentos harmônicos periódicos. O tempo de repetição T é chamado de período de oscilação e o seu inverso $f = 1/T$ de frequência. Veja que o sistema massa/mola da figura abaixo descreve um movimento harmônico, quando vibra.



Movimento harmônico descrito por um sistema massa/mola.

Note-se que no eixo do tempo a função registrada tem a forma precisa de uma senóide, definindo, então, a forma de onda mais simples registrada durante um movimento vibratório.

Como toda função seno, este movimento pode ser representado, matematicamente, pela equação:

$$x(t) = A_1 \cdot \text{sen}(\omega t + \phi)$$

Onde:

$x(t)$ - deslocamento da massa m ;

A_1 - amplitude do onda;

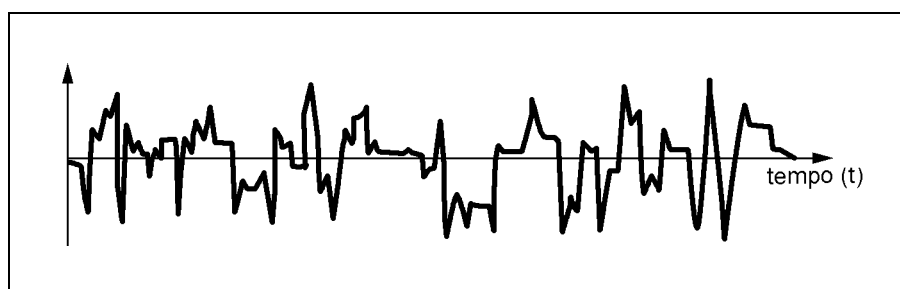
$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_1$ - velocidade angular;

ϕ - ângulo de fase.

Tipos de vibração

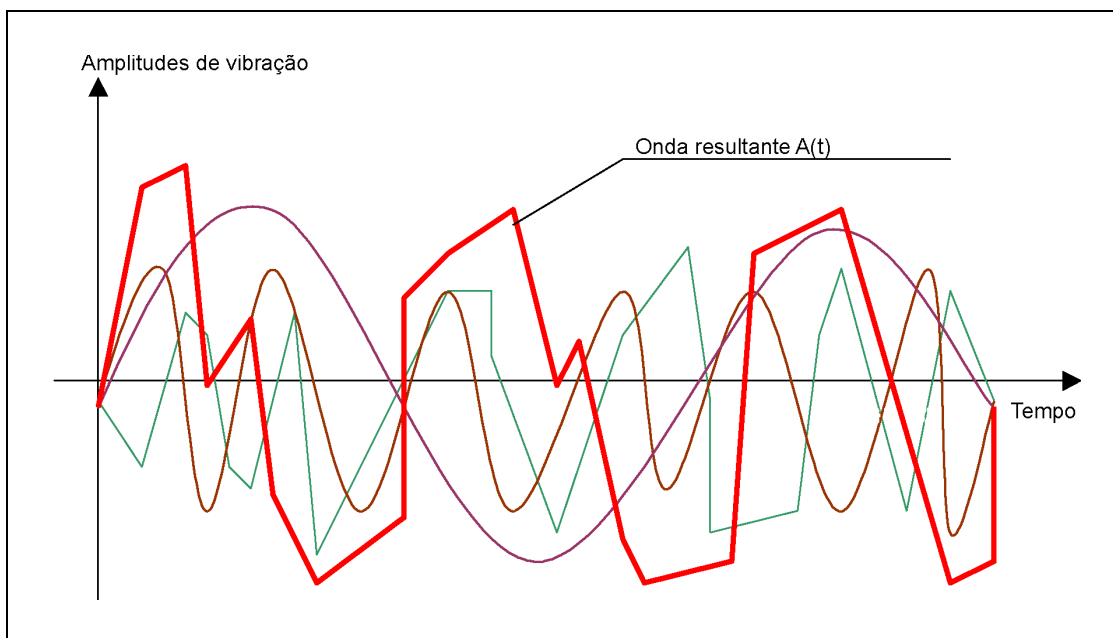
Vibrações não periódicas

São vibrações cuja curva (deslocamento x tempo) não se repete ao final de um período. Este tipo de vibração é provocado por forças de excitação irregulares, como, por exemplo, tráfego de veículos sobre uma ponte e forças de turbulências em aviões.

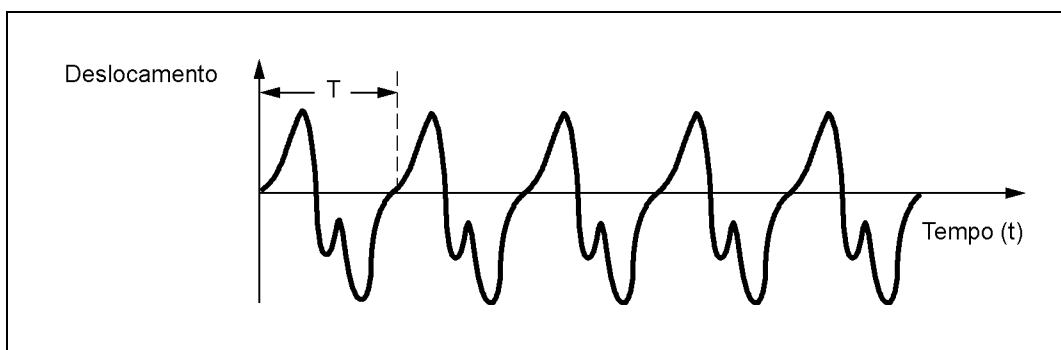


Vibrações periódicas

São vibrações cuja curva (deslocamento x tempo) repete-se exatamente após certo período de tempo. Vibrações periódicas são produzidas por excitações igualmente periódicas. Este é o tipo mais freqüente de vibrações em máquinas.



Na prática, a forma de onda que se observa nas máquinas é do tipo da figura acima. Ele é periódico, por se repetir igualmente, a cada intervalo de tempo T , mas não pode ser classificado como harmônico, uma vez que foge das características senoidais. No entanto, pode ser entendido como uma superposição de duas ou mais harmônicas de diferentes freqüências.



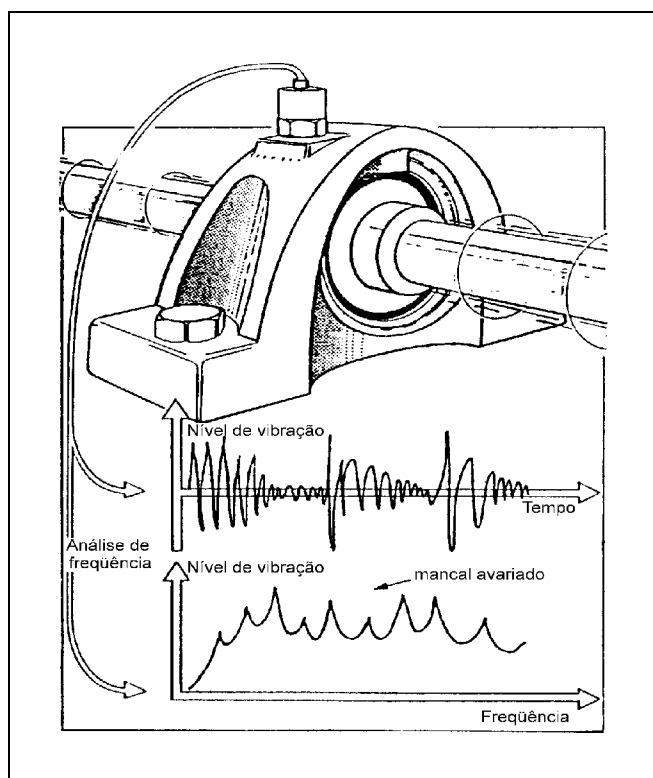
Os sistemas que vibram são caracterizados como lineares e não lineares. Para os primeiros, prevalece o princípio da superposição e os métodos matemáticos para o seu estudo estão bem desenvolvidos.

Para os sistemas não lineares, os métodos de análise são bem menos conhecidos e de difícil aplicação. Assim, costuma-se trabalhar na análise de vibrações considerando-se que um sinal de vibração é nada mais que um somatório de várias ondas senoidais.

Isto muitas vezes pode não ser uma maneira muito precisa de encarar o problema, quando o sistema tem parâmetros não lineares muito fortes, mas se não, é uma forma bem próxima da realidade e que ao mesmo tempo facilita os cálculos e o entendimento dos problemas.

Medições de vibração

A vibração mecânica é um fenômeno bastante complexo, resultante da combinação de várias excitações simultâneas sobre a máquina ou estrutura sob consideração como na ilustração abaixo.



As técnicas de medições agrupam número significativo de conceitos e regras práticas, exigindo da pessoa designada para o serviço um sem número de conhecimentos.

O responsável pela especificação dos aparelhos e processos de medidas, no caso um técnico, engenheiro ou pesquisador, deve considerar certos fatores para que seja tomada uma decisão sábia e correta, raciocinando sobre as etapas que seguem:

1. Que tipo de informações deseja obter.
2. Como obtê-las.
3. Onde colher os dados.
4. Como armazená-los da melhor forma.
5. De que forma apresentar os resultados.
6. Como interpretar os resultados.
7. Que decisão tomar.

O operador do instrumento precisa seguir alguns procedimentos para realizar o trabalho:

Conhecer o aparelho.

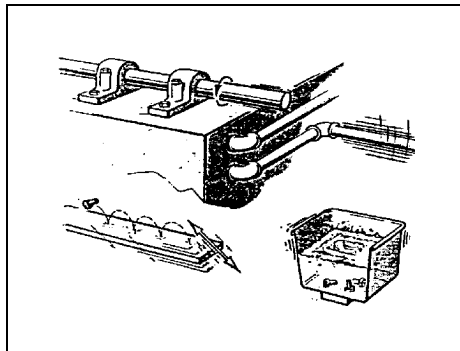
1. Receber treinamento de utilização.
2. Tirar o maior proveito das medições.
3. Executar as medições nos pontos preestabelecidos.
4. Anotar corretamente os valores obtidos.
5. Conhecer um mínimo da dinâmica do maquinário para poder avaliar as medições e situações de alarme.

Pontos de medição

O primeiro passo é colher os dados do maquinário em questão para se ter uma idéia dos pontos críticos (maiores níveis de vibração) que ele apresenta.

Conhecendo o que se deseja monitorar, é preciso identificar um ponto externo acessível durante o funcionamento da máquina.

A trajetória da vibração da fonte até o ponto de captação deve ser a mais sólida e curta possível, garantindo a máxima veracidade na transmissão, como, por exemplo, nos mancais de ponto de partida.



Caso não se conheça profundamente a máquina ou equipamento, deve-se levantar o maior número de pontos possíveis para garantir a aquisição de todas as informações.

Escolha dos parâmetros

- deslocamento
- velocidade
- aceleração
- frequência

Tratando-se de vibrações mecânicas, cada um dos parâmetros tem diferentes utilidades na análise da máquina.

Vejamos cada um deles com detalhes.

Com relação ao deslocamento, temos o percurso executado por um elemento ou sistema. A unidade oficial é o micrometro (μm).

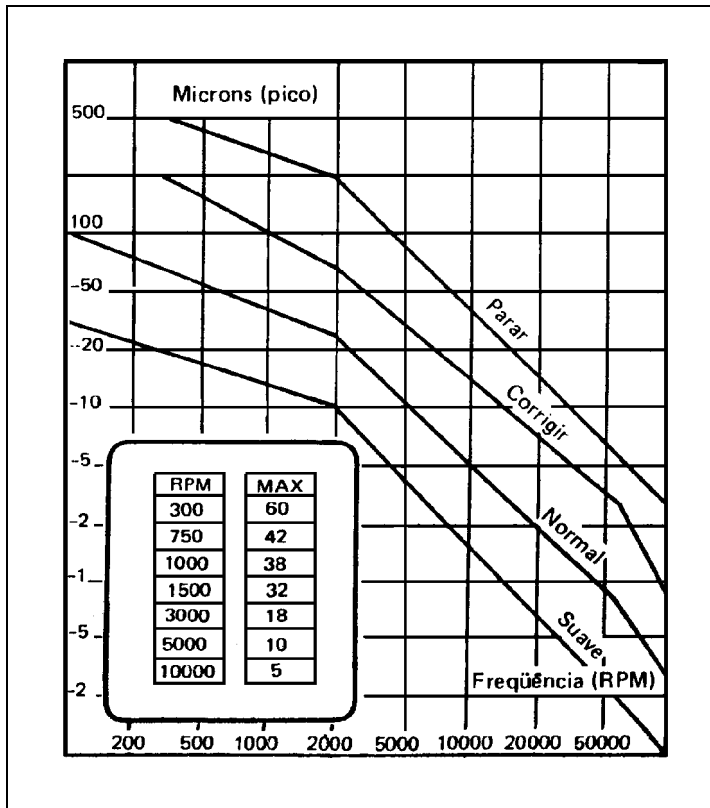
Este parâmetro tem grande utilização na indústria para:

- indicar a vibração do maquinário;
- monitorar através de alarme de indicação, o desbalanceamento ou empenamento de rotores;
- indicar folgas excessivas;
- verificar transmissibilidade;
- observar fadigas.

É muito importante que os pontos sejam numerados e identificados facilmente, para uma análise posterior. Salientamos ainda que se deve registrar a direção em que foi feita a medição (axial ou radial).

Para avaliação da severidade, a medida do deslocamento deverá ser acompanhada da frequência.

Para tal, utilizamos as curvas de **Rathbone** que servem de guia ideal para este parâmetro.



Tolerância para vibrações baseada no deslocamento

No caso da velocidade, cujo módulo é o produto da amplitude do sinal de deslocamento pela frequência circular, existe informação de severidade já embutida com a frequência de rotação.

A unidade normalizada para este parâmetro é o milímetro por segundo (mm/s).

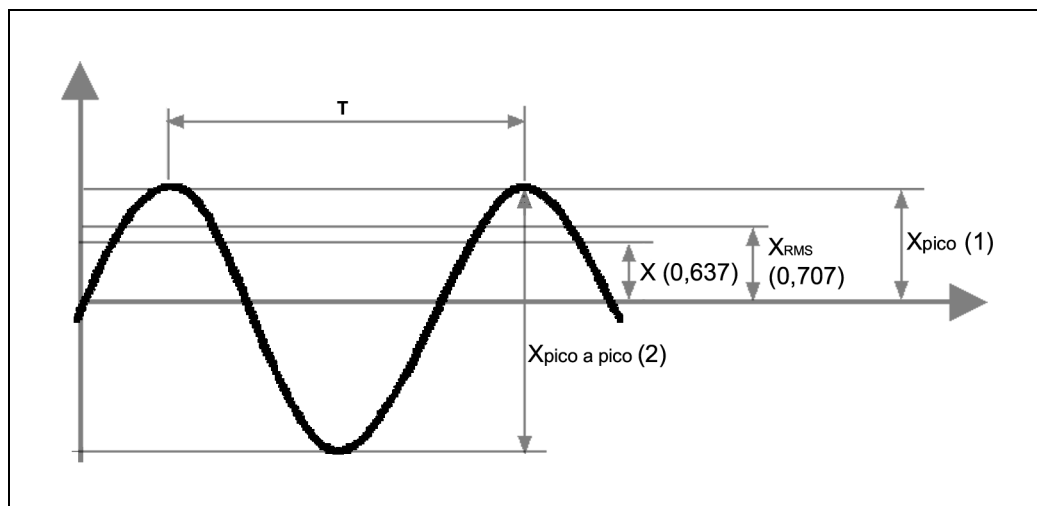
É utilizado em:

- indicadores de níveis de vibração.
- acompanhamento de quase todos os componentes da máquina.
- sistemas de monitoração contínua.

A aceleração oferece uma medida de vibração com grande conotação de severidade para componentes de alta frequência.

A quantificação do sinal de vibração

Existem várias maneiras de quantificar a amplitude do sinal de vibração no tempo. As unidades de medidas podem adquirir diferentes significados.



Quantificado do sinal de vibração

Com base na figura acima pode-se definir:

- Nível de RMS (Root Mean Square):** Raiz Média Quadrática. Provavelmente é a representação do nível de vibração mais usado. É a raiz quadrada da integral da função quadrática da onda no domínio do tempo. O valor do RMS traduz a energia contida na vibração e logo, o potencial de perigo da vibração. O valor do RMS de uma onda senoidal é $1/\sqrt{2}$ vezes o valor de pico.
- Valor de Pico:** Define o valor máximo do sinal de vibração e é mais usado nas medidas de impacto de curta duração. Porém, não representa nenhuma avaliação da vibração.
- Pico-a-Pico:** Utiliza-se para quantificar vibração representada através do parâmetro “deslocamento”. Este valor é raramente usado.
- Nível Médio:** Representa uma avaliação da vibração no tempo, porém não tem nenhum significado físico. Na figura acima o nível médio é coincidente com o eixo do tempo.
- Fator de Crista:** É a relação entre o valor de pico e o RMS. Quando a vibração transforma-se em mais impulsiva, ou mais randômica, o fator de crista cresce. Um exemplo de aplicação é em rolamentos. Às vezes uma falha de rolamento pode não ser detectada pelo valor de RMS, no entanto, o fator de crista altera-se.

Parâmetros do sinal de vibração e unidades de medição

A aceleração com a qual a estrutura vibra, ou sua velocidade, ou ainda o seu deslocamento estes três parâmetros podem ser medidos diretamente com acelerômetros, vibrômetros ou sensores de deslocamento, ou indiretamente, como será visto adiante. Normalmente a vibração é medida com acelerômetros, os quais medem aceleração.

Somente a análise de frequência pode revelar a composição de um sinal de vibração. Para medidas de “banda larga”, em máquinas rotativas, o parâmetro velocidade é o melhor em 70% dos casos, aceleração em 30% e deslocamento dificilmente usado. O parâmetro deslocamento é algumas vezes usado para medir vibrações de baixa frequência e grandes deslocamentos, freqüentemente encontrados em estruturas como navios, construções civis e pontes. Como regra geral sugere-se a seguinte tabela:

Parâmetros recomendáveis para medidas de vibração.

De 1 à 50 HZ	Deslocamento
De 50 a 1000 HZ	Velocidade
Acima de 1000 HZ	Aceleração

Durante medições em campo, observa-se uma maior estabilidade dos valores da velocidade de vibração do que da aceleração. Quando a finalidade é monitorar o nível de RMS para traçar curvas de tendência de falhas recomendam-se as medidas em velocidade. Ou quando se está diante de uma análise de severidade, comparando-se com valores recomendados por normas como a VDI-2056, ISO-2372 ou 150-3945, obrigatoriamente deve-se estabelecer o parâmetro velocidade, como será visto no próximo capítulo.

Quando sinais complexos como impactos e impulsos são medidos, a integração não deve ser usada, porque introduz erros de fase, resultando em sérios erros de medida na amplitude.

Possibilidades da análise de vibrações

Por meio da medição e análise das vibrações existentes numa máquina em operação, é possível detectar com antecipação a presença de falhas que podem comprometer a continuidade do serviço, ou mesmo colocar em risco a integridade física da máquina ou a segurança do pessoal da área.

A aplicação do sistema de análise de vibrações permite detectar e acompanhar o desenvolvimento de falhas nos componentes das máquinas.

Por exemplo, pela análise de vibrações constatam-se as seguintes falhas:

- rolamentos deteriorados;
- engrenagens defeituosas;
- acoplamentos desalinhados;
- rotores desbalanceados;
- vínculos desajustados;
- eixos deformados;
- lubrificação deficiente;
- folgas excessivas em buchas;
- falta de rigidez;
- problemas aerodinâmicos ou hidráulicos;
- cavitação;
- desbalanceamento de rotores de motores elétricos.

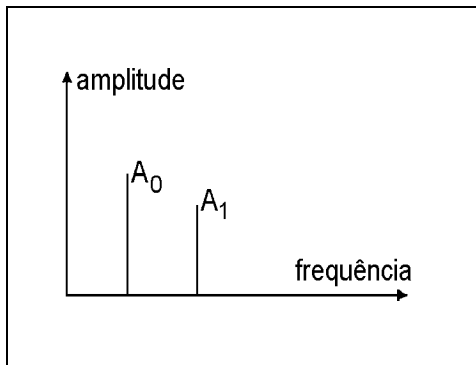
O registro das vibrações das estruturas é efetuado por meio de sensores ou captadores colocados em pontos estratégicos das máquinas. Esses sensores transformam a energia mecânica de vibração em sinais elétricos. Esses sinais elétricos são, a seguir, encaminhados para os aparelhos registradores de vibrações ou para os aparelhos analisadores de vibrações.

Os dados armazenados nos registradores e nos analisadores são, em seguida, interpretados por especialistas, e desse modo obtém-se uma verdadeira radiografia dos componentes de uma máquina, seja ela nova ou velha.

A análise das vibrações também permite, por meio de comparação, identificar o aparecimento de esforços dinâmicos novos, indicando uma degradação em processo de desenvolvimento.

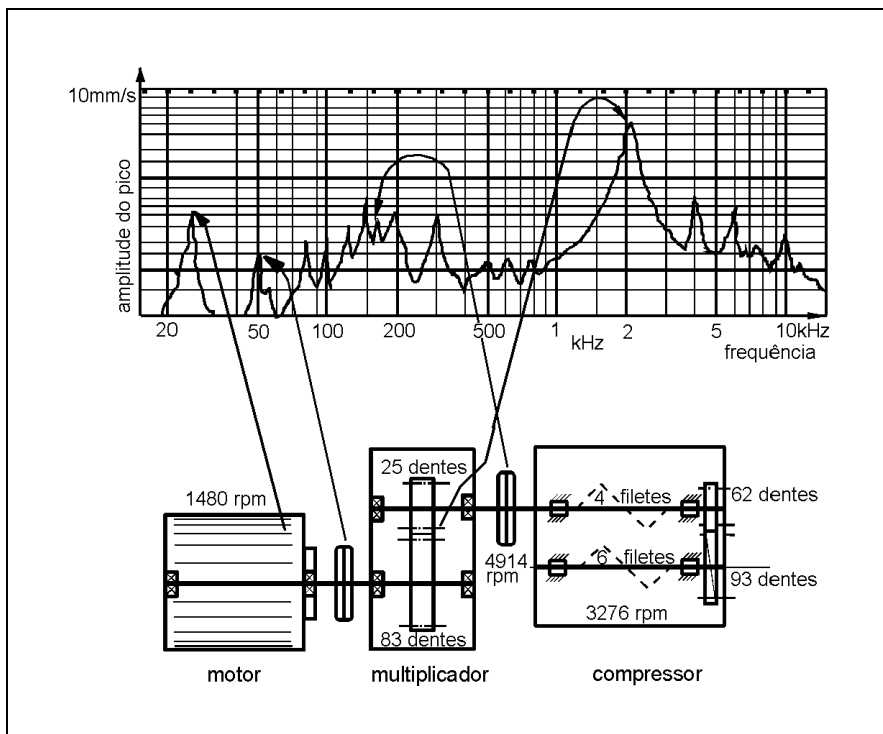
Os níveis de vibrações de uma máquina podem ser representados de várias maneiras; porém, a maneira mais usual de representação é a espectral ou freqüencial, em que a amplitude da vibração é dada de acordo com a freqüência.

Graficamente temos:



No ponto A_0 temos a amplitude de uma certa vibração, e no ponto A_1 a amplitude de uma outra vibração. Desse modo, em um espectro todos os componentes de um nível vibratório são representados sob a forma de picos que nos permitem seguir, individualmente, a variação da amplitude de cada vibração e discriminar, sem mascaramentos, os defeitos em desenvolvimento nos componentes das máquinas.

A figura a seguir mostra um gráfico real de uma análise espectral. Esse gráfico foi gerado por um analisador de vibrações completo.



Análise espectral das principais anomalias

As anomalias espectrais podem ser classificadas em três categorias, relacionadas a seguir.

1. Picos que aparecem nas frequências múltiplas ou como múltiplos da velocidade desenvolvida pelo rotor

Dentro dessa categoria, os picos são causados pelos seguintes fenômenos:

- desbalanceamento de componentes mecânicos;
- desalinhamento;
- mau ajuste mecânico;
- avarias nas engrenagens;
- turbilhonamento da película de óleo;
- excitação hidrodinâmica;
- mau estado da correia de transmissão.

O fenômeno do desbalanceamento é a causa mais comum das vibrações, sendo caracterizado por uma forte vibração radial que apresenta a mesma frequência de rotação do rotor.

O desalinhamento também é bastante comum em máquinas e provoca vibrações na mesma frequência de rotação do rotor, ou em frequências múltiplas, notadamente no caso de dentes acoplados.

Quando há mau ajuste mecânico de um mancal, por exemplo, ou quando ocorre a possibilidade de um movimento parcial dele, no plano radial surge uma vibração numa frequência duas vezes maior que a velocidade de rotação do eixo. Essa vibração aparece por causa do efeito de desbalanceamento inicial e pode adquirir uma grande amplitude em função do desgaste do mancal.

No caso de engrenamento entre uma coroa e um pinhão, por exemplo, ocorrerá sempre um choque entre os dentes das engrenagens. Isto gera uma vibração no conjunto, cuja frequência é igual à velocidade de rotação do pinhão multiplicado pelo seu número de dentes.

O mau estado de uma correia em “V” provoca variação de largura, sua deformação etc. e, como consequência, faz surgirem variações de tensão que criam vibrações

de frequência iguais àquelas da rotação da correia. Se as polias não estiverem bem alinhadas, haverá um grande componente axial nessa vibração.

2. Picos que aparecem em velocidades independentes da velocidade desenvolvida pelo rotor

Os principais fenômenos que podem criar picos com frequências não relacionadas à frequência do rotor são causados pelos seguintes fatores:

- **Vibração de máquinas vizinhas** – O solo, bem como o apoio de alvenaria que fixa a máquina, pode transmitir vibração de uma máquina para outra.
- **Vibrações de origem elétrica** – As vibrações das partes metálicas do estator e do rotor, sob excitação do campo eletromagnético, produzem picos com frequências iguais às do rotor. O aumento dos picos pode ser um indício de degradação do motor; por exemplo: diferenças no campo magnético do indutor devido ao número desigual de espiras no enrolamento do motor.
- **Ressonância da estrutura ou de eixos** – Cada componente da máquina possui uma frequência própria de ressonância. Se uma excitação qualquer tiver uma frequência similar àquela de ressonância de um dado componente, um pico aparecerá no espectro.
- As máquinas são sempre projetadas para que tais frequências de ressonância não se verifiquem em regime normal de funcionamento, aceitando-se o seu aparecimento somente em regimes transitórios.

3. Densidade espectral proveniente de componentes aleatórios da vibração

Os principais fenômenos que provocam modificações nos componentes aleatórios do espectro são os seguintes:

- **Cavitação** – Esse fenômeno hidrodinâmico induz a vibrações aleatórias e é necessário reconhecê-las para eliminá-las, modificando-se as características de aspiração da bomba. A cavitação pode ser também identificada pelo ruído característico que produz.
- **Escamação dos rolamentos** – A escamação de uma pista do rolamento provoca choques e ressonância do mancal, e é fácil de se identificar com um aparelho de medida de ondas de choque. Na análise espectral, esse fenômeno aparece nas altas frequências, para uma densidade espectral que aumenta à medida que os rolamentos deterioram. Se a avaria no rolamento fosse em um ponto apenas, seria possível ver um pico de frequência ligado à velocidade do rotor e às dimensões do rolamento (diâmetro das pistas interiores e exteriores, número de rolamentos etc.), porém isto é muito raro. Na verdade, um único ponto deteriorado promove a propagação da deterioração por toda a superfície

da pista e por outras peças do rolamento, criando, assim, uma vibração do tipo aleatória.

- **Atrito** – O atrito gera vibrações de frequência quase sempre elevada. O estado das superfícies e a natureza dos materiais em contato têm influência sobre a intensidade e a frequência das vibrações assim criadas. Parâmetros deste tipo são esporádicos, difíceis de analisar e de vigiar.

A tabela a seguir resume as principais anomalias ligadas às vibrações.

Causa	Vibração		Observações
	Frequência	Direção	
Turbilhão de óleo	De 0,42 a 0,48 x FR FR = Frequência de rotação	Radial	Unicamente sobre mancais lisos hidrodinâmicos com grande velocidade.
Desbalanceamento	1 x FR Radial	Radial	Intensidade proporcional à velocidade de rotação
Defeito de fixação	1, 2, 3, 4 x FR	Radial	
Defeito de alinhamento	2 x FR	Axial e radial	Vibração axial em geral mais importante, se o defeito de alinhamento contém um desvio angular.
Excitação elétrica	1, 2, 3, 4 x 60Hz	Axial e radial	Desaparece ao se interromper a energia elétrica.
Velocidade crítica de rotação	Frequência crítica do motor	Radial	Aparece em regime transitório e desaparece em seguida.
Correia em mau estado	1, 2, 3, 4 x FR	Radial	
Engrenagens defeituosas	Frequência de engrenamento = F F = n° de dentes x FR árvore	Radial + axial	Banda lateral em torno da frequência de engrenamento.
Pinhão (“falsa volta”)	F ± FR pinhão	Radial + axial	Bandas laterais em torno da frequência de engrenamento devido às “falsas voltas”.
Excitação hidrodinâmica	Frequência de passagem das pás	Radial e axial	
Deterioração do rolamento	Altas frequências	Radial e axial	Ondas de choque causadas por escamações.

Mais alguns parâmetros para medição e análise de vibrações

Amplitude de velocidade

Para equipamentos em que a carga é relativamente CTE, ou seja, não sujeita à variações bruscas ou pisos, como o caso de prensas ou trituradores pode-se admitir a seguinte norma:

- Equipamentos em muito bom estado de funcionamento, valores inferiores a 2,5mm/seg.
- Equipamentos com começo de falha valores entre 2,5 e 4mm/seg.
- Equipamentos com algum componente estragado ou com elementos desbalanceados, valores entre 4 e 6,5mm/seg.
- Trocar componentes imediatamente ou elementos muito desbalanceados, valores superiores a 6,5mm/seg.

Equipamentos

A evolução do estado e estimativa da vida útil se obtém de forma direta mediante a leitura do padrão incorporado à escala entre 200 e 12.000rpm para motores elétricos, bombas, ventiladores, árvores de transmissão, eixos conduzidos etc:

Para valores superiores à 12.000rpm pode-se confundir o defeito do rolamento com um desbalanceamento do rotor da máquina.

Caixas de engrenagens

A freqüência do sinal gerado por engrenagens se encontra dentro da faixa correspondente à dos rolamentos, devendo ser tomadas as seguintes precauções:

1. Verificar se o redutor funcionando a plena carga e com todos os seus rolamentos em perfeitas condições, os valores medidos não superam 1/3 da escala.
2. Para redutores que cumpram a condição acima, acusando um aumento do valor medido localizado em um dos rolamentos, a classificação de seu estado mecânico será diretamente indicada pela escala. Quando se observa um desenvolvimento generalizado dos valores medidos, deverá ser considerada a possibilidade de falhas na engrenagem como dentes estragados, deficiência na lubrificação, desgaste, desajuste, etc.
3. Para redutores que não satisfaçam a condição I, não será possível distinguir entre as falhas dos rolamentos ou das engrenagens.

Determinação de freqüência

Na determinação da freqüência das vibrações deverão ser feitas medições sucessivas de velocidade e deslocamento em um mesmo ponto: com ambos valores e utilizando o gráfico I pode-se encontrar o valor da freqüência correspondente.

Naturalmente para este cálculo da freqüência, supõe-se que a vibração é uma senoide pura.

Captação dos sinais de vibração com transdutores

Os sensores são componentes fundamentais para o recebimento de informações, merecendo uma atenção bastante cuidadosa por parte do usuário.

Existem dois tipos de transdutores básicos para a medida de vibração mecânica: **absolutos e relativos**.

São chamados **absolutos** os transdutores que medem a vibração de um corpo sem vínculo com alguma referência externa, ou seja, somente o movimento alternado é medido. Nesta categoria estão o vibrômetro e o acelerômetro, que são firmemente presos ao equipamento sob medição.

Os transdutores denominados **relativos** são acondicionados fora do elemento cuja vibração se deseja medir, e ela é captada em relação àquele ponto de fixação.

Sensores ou captadores

Existem três tipos de sensores mecânico-elétricos baseados em três diferentes sistemas de transdução:

- **sensores eletrodinâmicos**: detectam vibrações absolutas de frequências superiores a 3Hz (180cpm).
- **sensores piezoelétricos**: detectam vibrações absolutas de frequências superiores a 1Hz (60cpm).
- **sensores indutivos** (sem contato ou de proximidade): detectam vibrações relativas desde 0 Hz, podendo ser utilizados tanto para medir deslocamentos estáticos quanto dinâmicos.

Registradores e medidores

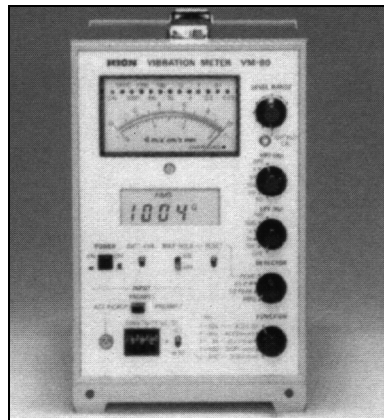
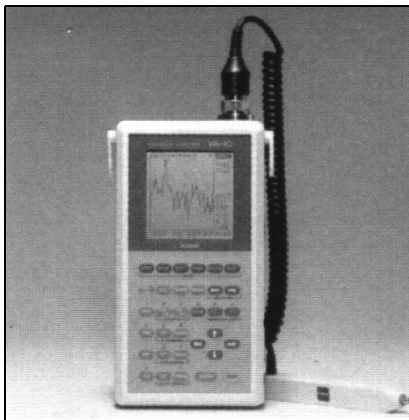
Esses aparelhos medem a amplitude das vibrações, permitindo avaliar a sua magnitude. Medem, também, a frequência, possibilitando identificar sua fonte causadora.

Os registradores podem ser analógicos ou digitais, e estes últimos tendem a ocupar todo o espaço dos primeiros.



Analísadores

Existem vários tipos e, entre eles, destacam-se: analisadores de medição global, analisadores com filtros conciliadores (fornecem medidas filtradas para uma gama de freqüência escolhida, sendo que existem os filtros de porcentagem constante e os de largura da banda espectral constante) e analisadores do espectro em tempo real.



Os analisadores de espectro e os softwares associados a eles, com a presença de um computador, permitem efetuar:

- zoom, que é uma função que possibilita a ampliação de bandas de freqüência;
- a diferenciação e integração de dados;
- a comparação de espectros;
- a comparação de espectros com correção da velocidade de rotação.

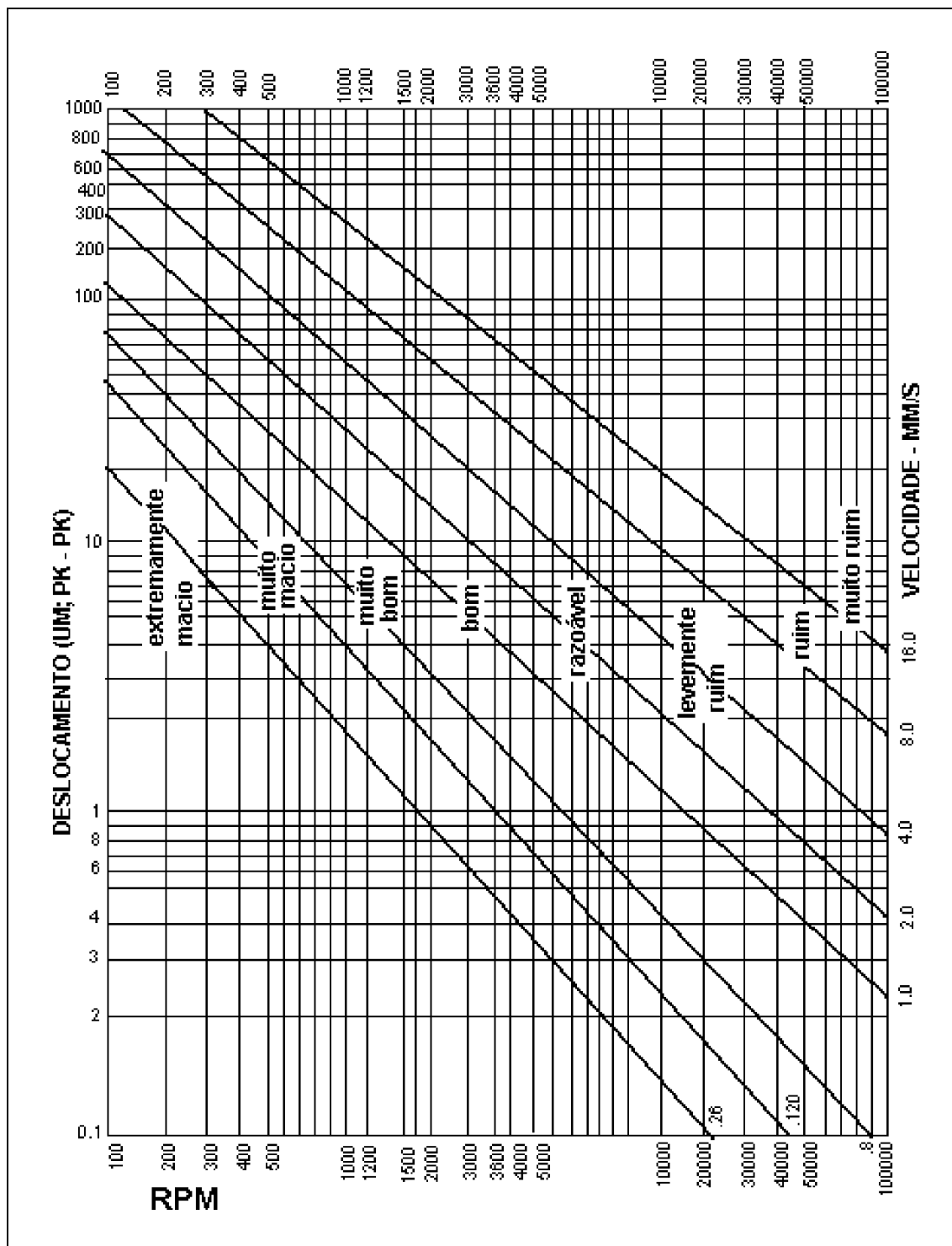


Gráfico geral de vibração

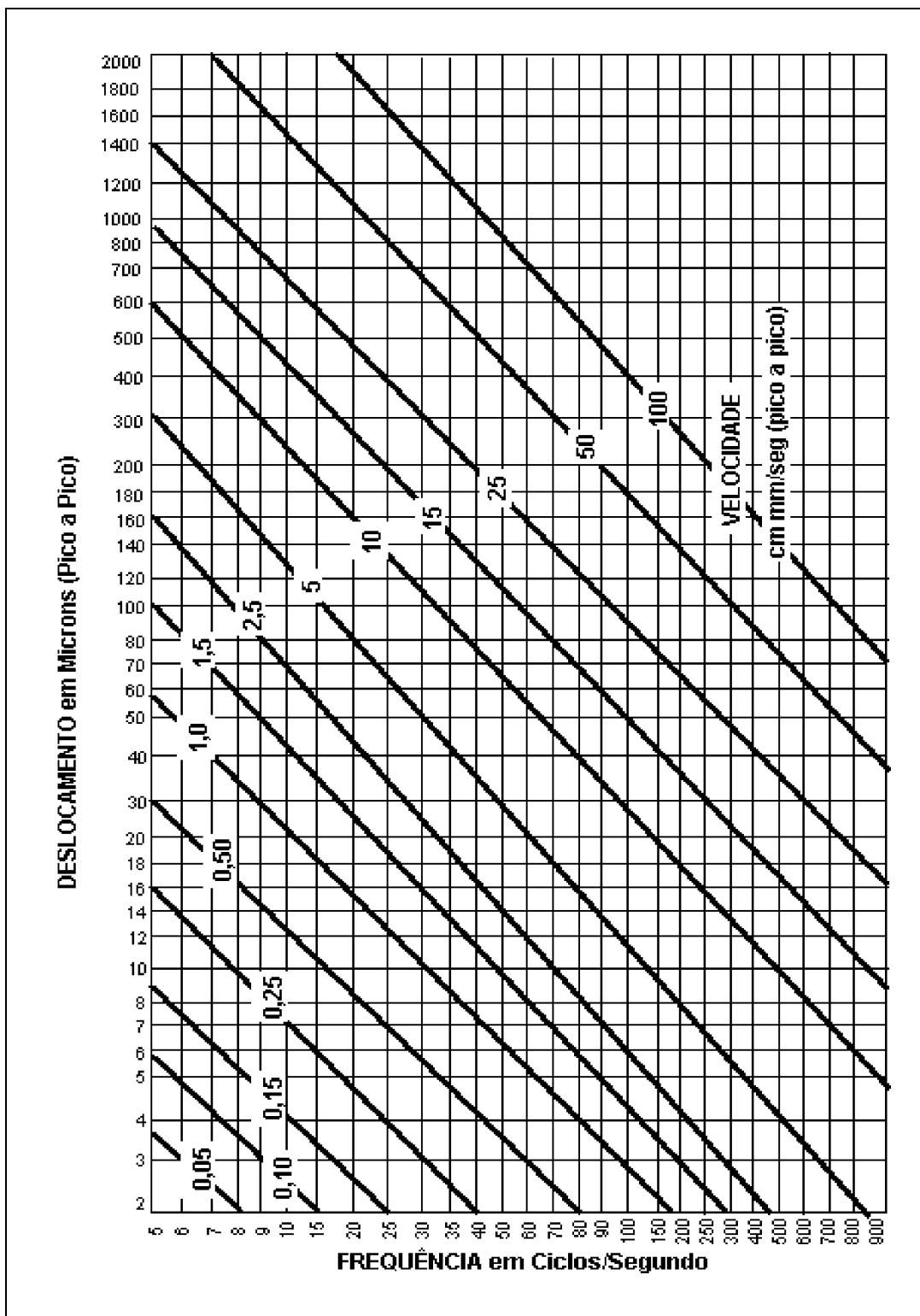


Gráfico para a determinação da frequência de uma vibração

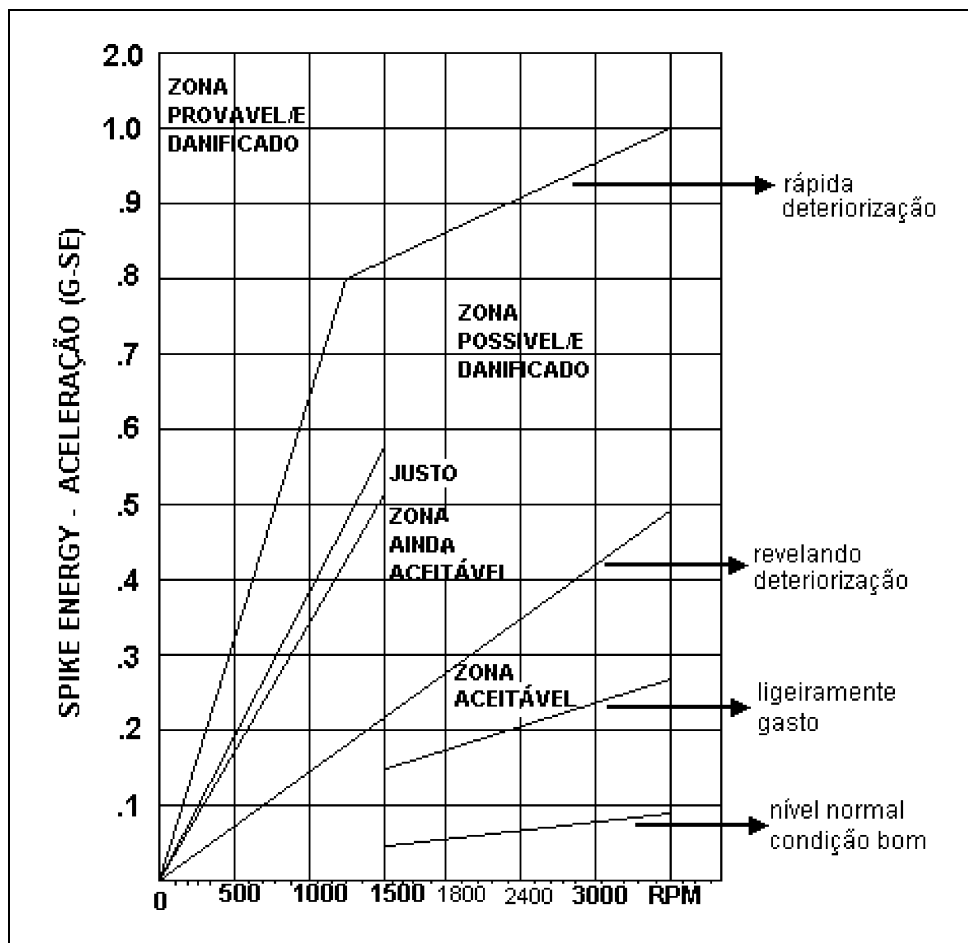
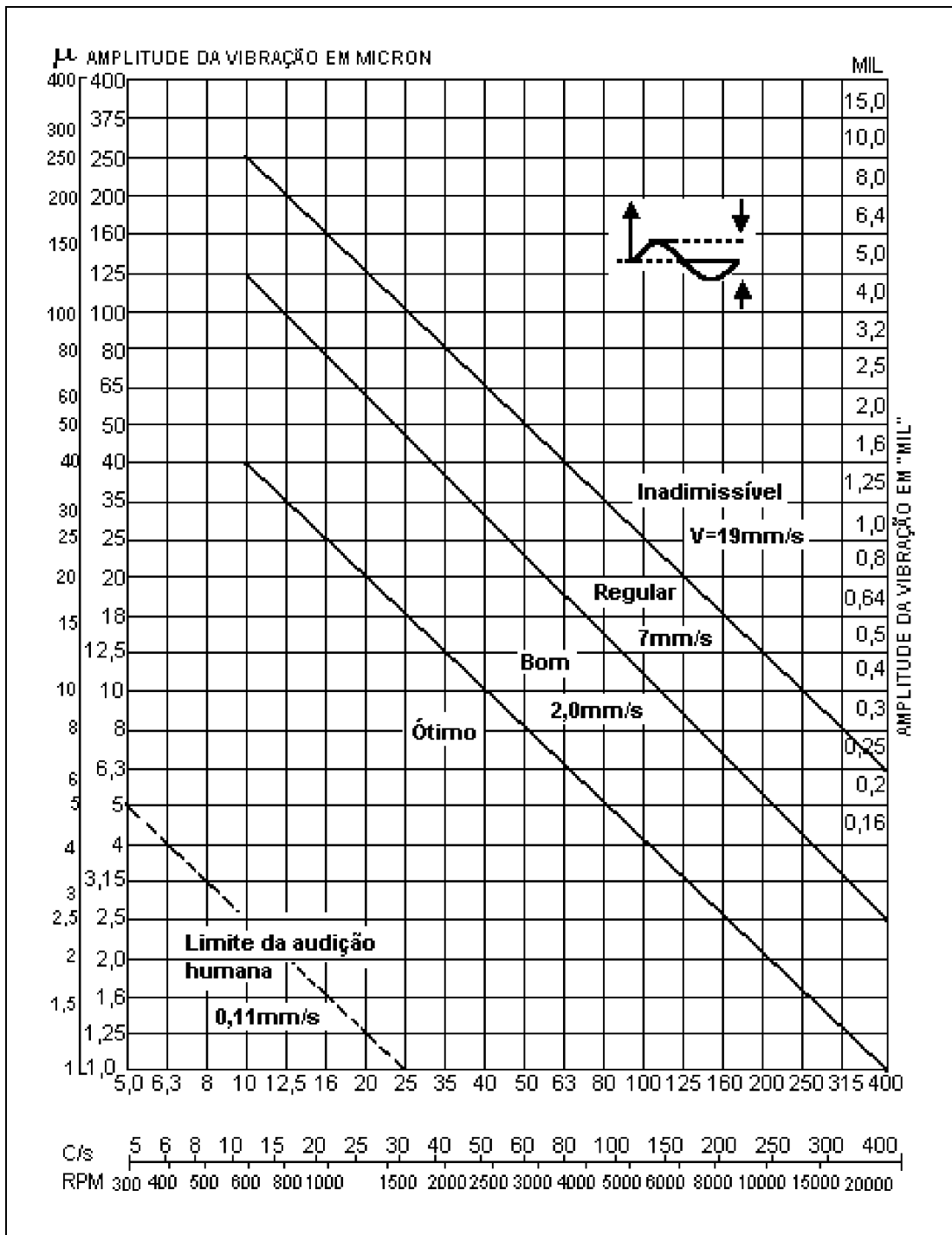
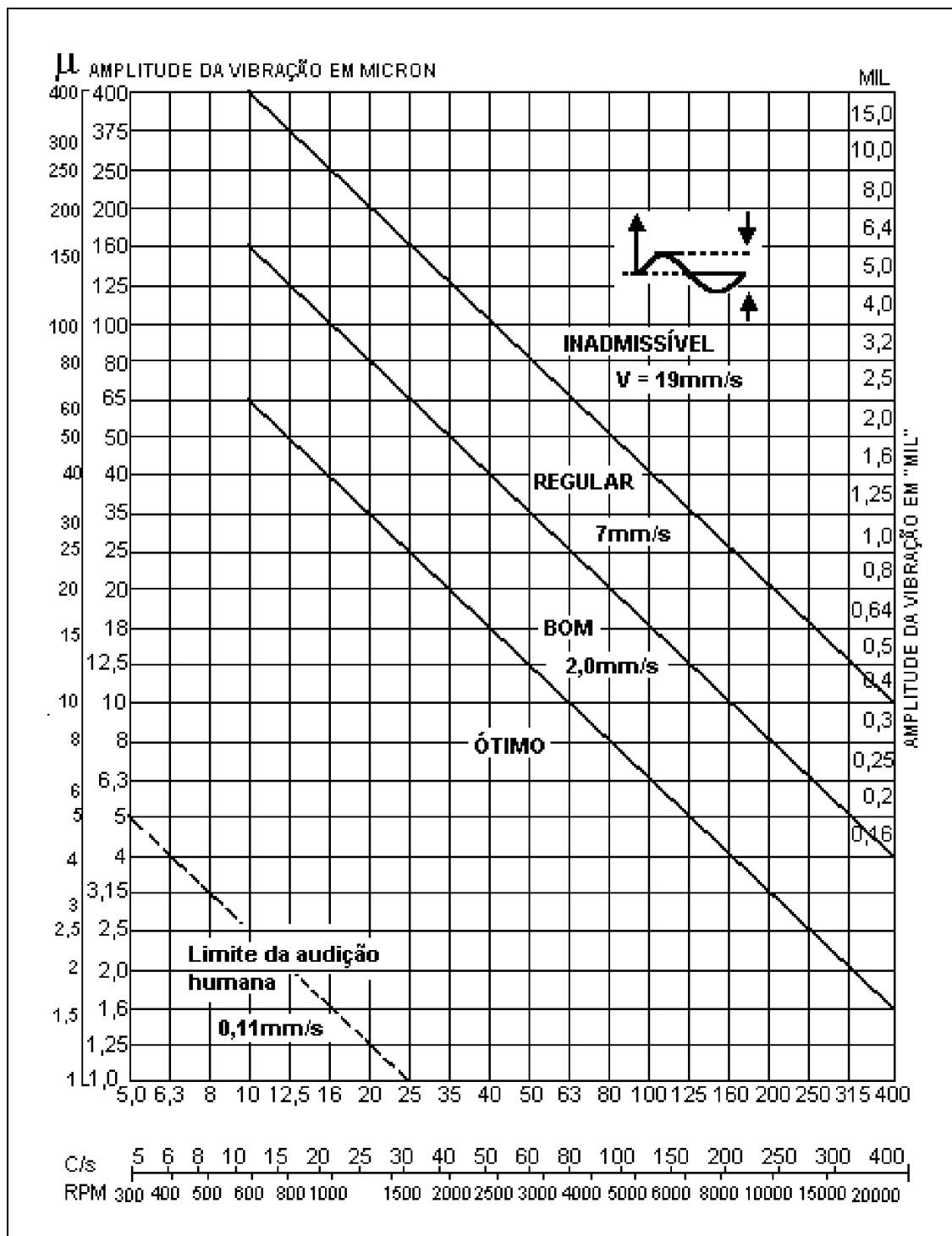


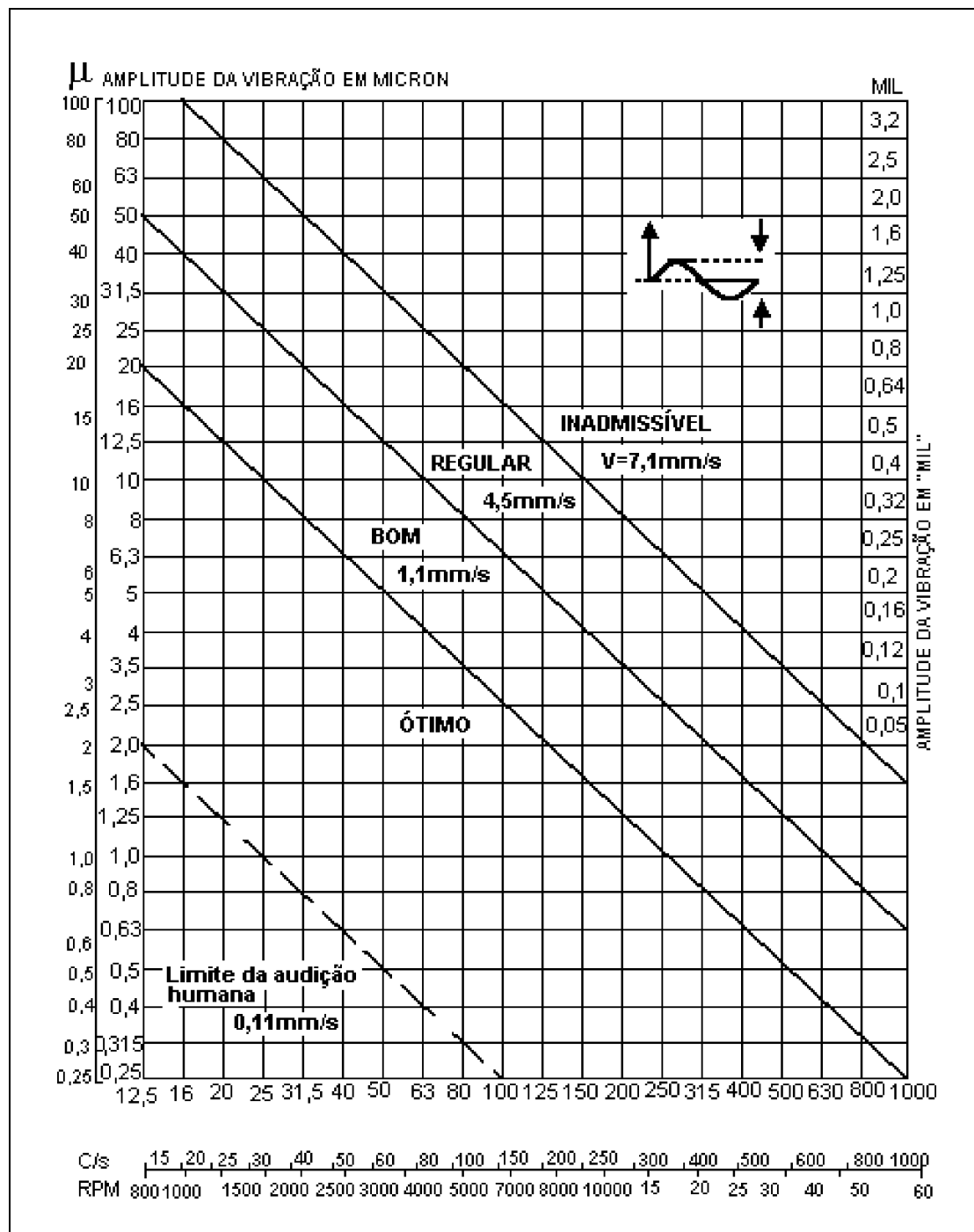
Gráfico para avaliação de rolamentos



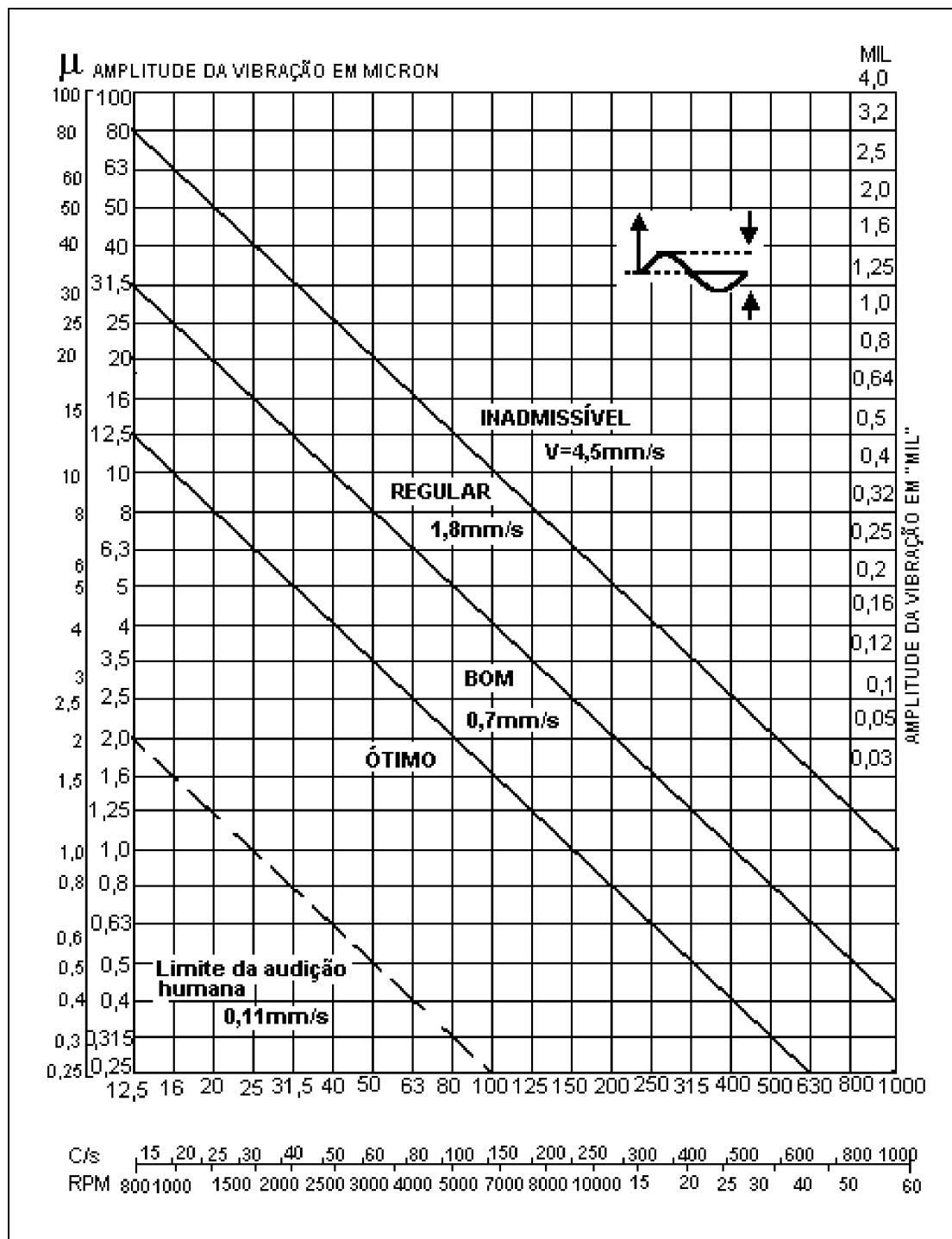
Equipamento G – Grandes máquinas solidárias a um único bloco de fundação



Equipamento do grupo T – Grandes máquinas turbinas e turbo compressores



Equipamentos do grupo M – Máquinas médias, motores entre 15 a 75kw



Equipamento do grupo K – Motores elétricos até 15kw, moto-bombas e monobloco

Termômetro

Termômetro é um instrumento utilizado para medir temperaturas. Existem vários tipos de termômetros que podem ser aplicados em diversas áreas, desde a clínica até a industrial, para monitoramento das temperaturas dos ambientes. Na mecânica, o controle de temperatura está diretamente ligado à manutenção dos equipamentos, pois temperaturas elevadas podem ser sinal de mau funcionamento de um conjunto ou elemento mecânico.

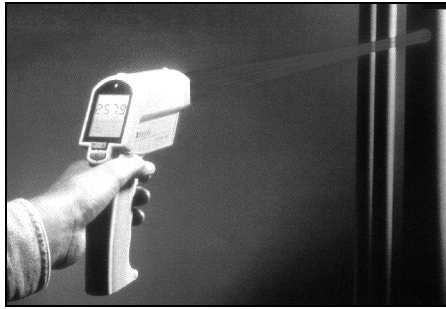
Na mecânica, os termômetros são empregados nos processos de manutenção preditiva, já que muitas vezes o monitoramento dos equipamentos por meio deles pode antever possíveis danos e eventuais paradas por quebra.

Termômetro com infra-vermelho

O termômetro com sensor infra-vermelho, que é o componente que capta a temperatura, é um instrumento que faz leitura da temperatura sem manter contato com o equipamento; alguns desses termômetros possuem uma mira laser que facilita no direcionamento do infra-vermelho.



Termômetros infravermelhos



Termômetro infravermelho com mira laser

Aplicação dos termômetros com infra-vermelho

O termômetro com infra-vermelho é muito empregado nas manutenções mecânica e elétrica, pois possibilita as medições de temperatura com a máquina ou equipamento em funcionamento, fornecendo, instantaneamente, a uma distância segura, valores de temperatura que indicam possíveis anomalias no equipamento analisado.

O termômetro com infra-vermelho pode ser aplicado em:

- rolamentos, eixos e engrenagens;
- painéis elétricos, disjuntores e geradores;
- vazamentos de dutos;
- monitoração de cilindros de motores a combustão.

Aplicação da termografia

O objetivo é apresentar aplicação do termovisor nas instalações elétricas como meio de detecção de possíveis falhas.

É de grande importância a manutenção pois possibilita efetivar a medição de temperatura à distância sem necessidade de contato físico, obtendo-se informações sobre as condições dos componentes medidos.

A termografia é uma técnica utilizada nas medições de temperaturas a partir da radiação naturalmente emitida pelos corpos no campo do infravermelho.

Esta técnica possibilita a medição de temperatura à distância e a determinação de imagens térmicas (termogramas) a partir da radiação infravermelha naturalmente emitida pelos corpos em função de sua temperatura absoluta. Uma das aplicações mais importantes se dá no campo dos sistemas elétricos.

A medição é realizada com instrumento denominado termovisor e são comparados os resultados entre as radiações emitidas pelo objeto observado e a radiação de uma temperatura de referência que, normalmente, é a do meio ambiente.

Na área elétrica, a termografia é de grande importância, pois permite localizar componentes defeituosos sem a necessidade de contato físico e interrupções de fornecimento de energia ao sistema elétrico.

Falhas em redes de transmissão, distribuição, subestações e centros de carga podem causar interrupções não programadas, cuja prevenção pode ser auxiliada pela termografia.

Termografia

A existência da porção infravermelha no espectro eletromagnético foi descoberto em 1800 pelo astrônomo inglês Sir. Willian Hersschel. A descoberta ocorreu durante suas pesquisas para novos materiais nos filtros éticos dos telescópios usados para análise dos fenômenos solares.

Entre 1920 e 1940, vários programas secretos, para fins militares, se concentraram no desenvolvimento de detectores de infravermelho que detectassem o movimento de tropas e da artilharia inimiga durante a noite.

Os sistemas inicialmente desenvolvidos necessitavam, aproximadamente, de 10 minutos para a formação de imagens térmicas, e se restringiam a objetos fixos.

A partir de 1965, foi introduzido no mercado o primeiro instrumento capaz de formar imagens térmicas instantâneas, tanto para objetos fixos como em movimento.

Na década de 70 a termografia se tomou uma técnica largamente utilizada nas indústrias siderúrgicas, companhias de geração e distribuição de energia elétrica, indústrias petroquímicas, medicina etc.

A técnica que permite a interpretação pela visão humana, através do espectro infravermelho da radiação emitida pêlos corpos, é chamada de termografia.

A termografia possibilita a obtenção de imagens térmicas, chamadas termogramas, as quais permitem uma análise quantitativa para identificação de níveis isotérmicos e a determinação da temperatura dos corpos.

Conceito de termografia

Termografia é o nome dado à técnica de se obter imagens de calor ou imagens de irradiações infravermelho empregando equipamentos eletrônicos ou câmeras às quais possibilitam visualizar as variações de irradiações infravermelho em um visor que inclusive pode ser gravado por diversos métodos.

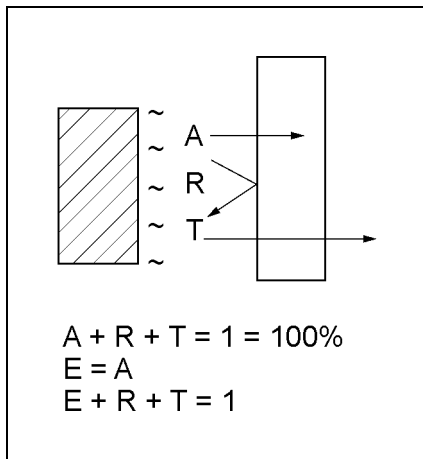
Emissividade

Emissividade é um dos três termos bastante usados quando se refere à termografia ou medidas de temperatura.

Os três termos portanto são:

- Emissividade = E
- Reflexão = R
- Transmissão = T

Para entendermos esses termos, vamos observar a figura a seguir:



A = absorção

R = reflexão

T = transmissão

E = emissividade

O corpo do lado esquerdo está mais aquecido que o da direita, portanto está irradiando calor para o corpo do lado direito. O que pode ocorrer com o calor ou energia irradiada (raios infravermelhos) ao chegar no corpo da direita é o seguinte:

1. Parte da energia é absorvida (A) pelo corpo da direita
2. Parte da energia é refletida (R) pelo corpo da direita
3. Parte da energia é completamente transmitida (T) pelo corpo da direita

Então, dependendo das características do corpo da direita, mais ou menos energia será absorvida ou mais ou menos será refletida, ou então, mais ou menos será transmitida.

A soma da energia absorvida + refletida + transmitida é igual a 100% da energia irradiada, portanto, a soma dos coeficientes A, R e T deve ser igual a 1.

Se a situação é invertida, e o corpo da direita está agora mais aquecido que o da esquerda, vai ocorrer transferência de calor (energia) para o do corpo do lado esquerdo.

Pode ser demonstrado que a característica própria do corpo ou seja, sua capacidade de irradiar calor (Emissividade), é exatamente igual à sua capacidade de absorver calor.

Desta forma, A (Absorção) pode ser substituída por E (Emissividade), resultando no que foi colocado na fórmula da figura anterior $E + R + T = 1$.

A emissividade de um corpo depende do tipo do material que é constituído o corpo (borracha, ferro, cerâmica etc.) e também como é a superfície do corpo (áspera, lisa, lustrosa, etc.).

A seguir, temos uma tabela de diversos materiais com diferentes superfícies e as respectivas emissividades.

Material	Superfície	E
Alumínio	Polida	05
	Áspera	07
	Oxidada	25
Amianto	Cartão	22
	Papel	03
Latão	Leve esmaltado	85
	Refratário	85
	Bem queimado	90
	Comum de barro	94
Bronze	Polido	10
	Áspero	55
Carbono	Puro	80
Ferro	Fundido	81
	Polido	21
Cimento		54
Carvão	Pó	96
Cromo	Polida	10
Cobre	Comercial	07
	Eletrolítico	02
	Oxidado	65
	Muito oxidado	88
Esmalte		90
Verniz		90
Ouro	Polida	02
Grafite	Pó	97
Gypsum		
Gelo		97
Ferro	Laminado	77
	Oxidado	74

Galvanizado Estampado Forjado	Galvanizado	23
	Oxidado	28
	Polido	16
Baquelite	Polido	28
	Envernizada	93
	Porosa	97
	Brilhante	87
Mercurio		10
Níquel	Liga ferro	05
Níquel	Polida	05
Pintura a óleo		94
Papel		90
Papel	Porosa	94
Platina	Polida	08
Porcelana	Envernizada	92
Quartzo		93
Borracha		95
Shellac, Black, Dull		91
Neve		80
Estanho		05
Aço	Galvanizada	28
	Muito oxidada	88
	Lam. a frio	24
	Áspera	96
	Oxidada	69
	Chapa laminada	56
Tungstênio		05
Água		98
Madeira	Plainada	85
F. Flambe		20

Aparelhos de medição

Pirômetros ou radiômetros

Pirômetros são dispositivos de se medir temperatura à distância, ou seja, não precisam ter um ponto em contato com a superfície do corpo cuja temperatura se queira medir.

Importante

Não se deve confundir os Pirômetros ou Radiômetros com Equipamentos de Visão Infravermelho (Termovisores).

Os Pirômetros e Radiômetros medem a temperatura do ponto para onde está sendo dirigida a mira do aparelho.

Termovisores

Os Equipamentos de Visão Infravermelho (Termovisores) são equipamentos mais sofisticados que permitem a análise da distribuição térmica de um objeto completo, de toda uma região ou de vários objetos ao mesmo tempo.

Normalmente, os equipamentos de termovisão têm agregados Radiômetros ou Pirômetros e desta forma pode-se ter a imagem térmica e se medir a temperatura dos pontos desejados.

Os termovisores podem fornecer imagens em preto e branco ou em cores. No caso das imagens em preto e branco, tem-se que uma temperatura mais elevada é mais branca e uma temperatura mais baixa aparece mais escura. No caso das imagens em cores visualizam-se as diferentes temperaturas através das diferentes cores.

Componentes do termo visor:

Os principais componentes do termovisor são:

Unidade de câmera - A unidade de câmera é constituída de:

- Receptor óptico: lentes, filtros e diafragma.
- Mecanismo de varredura: prisma horizontal e vertical.
- Detector e reservatório de nitrogênio (Frasco de Dewar).

Aplicação da termografia em sistemas elétricos

A energia elétrica, desde a sua geração, transmissão e distribuição, passa por milhares de equipamentos e conexões.

Os defeitos nos diversos componentes podem causar interrupções no fornecimento de energia, acarretando enormes prejuízos às concessionárias e consumidores.

Portanto, é muito importante que o serviço de distribuição de energia elétrica seja cada vez mais confiável e contínuo.

Uma conexão elétrica em boas condições tem uma resistência de contato mais baixa que um pedaço de condutor de comprimento equivalente e, portanto, opera com temperatura igual ou inferior à dos condutores adjacentes.

Quando a conexão está defeituosa, os valores da resistência de contato são elevados e se aquecem proporcionalmente aos valores quadráticos de corrente ($P = Ri^2$).

Todos os corpos acima de zero graus absoluto (-273° C), emitem radiação eletromagnética. O aparelho termovisor, através de um detector de alta sensibilidade colocado na base de sua câmera, converte a energia radiante em sinal elétrico.

Aplicações

Podemos direcionar nossa imaginação sobre as mais variadas aplicações de um "dispositivo" que nos fornece a possibilidade de enxergar as irradiações infravermelho (calor). Alguns exemplo de aplicações :

- Verificação de falhas de isolações térmicas em:
 - Paredes
 - Tetos
 - Tubulações
 - Trocadores de calor
- Verificações de aquecimento em:
 - Mancais de máquinas girantes
 - Conexões elétricas
 - Equipamentos mecânicos
 - Equipamentos elétricos

Análises de defeitos/problemas que se caracterizam por variações de temperatura para mais ou para menos.

Dos exemplos citados acima, as aplicações atualmente mais utilizadas se referem às inspeções nos sistemas elétricos.

Planejamento das inspeções termográficas

O planejamento é uma atividade indispensável ao administrador moderno. As inspeções termográficas também precisam ser planejadas para se obter:

- Maior rendimento das inspeções - mais pontos inspecionados no mais breve tempo disponível.
- Qualidade adequada nas inspeções
- Maior retorno do investimento efetuado

O planejamento por exemplo deve considerar:

- a. Periodicidade das inspeções: Defina uma periodicidade em função da confiabilidade maior ou menor do equipamento ou do sistema ou ainda dos riscos ou dos problemas que têm ocorrido. Na área industrial, atualmente estão sendo praticados períodos trimestrais, semestrais ou anuais.
- b. Roteiro de inspeções: Estabeleça um roteiro considerando:
 - Trajetória a ser seguida evitando-se deslocamentos desnecessários.
 - A trajetória também deve considerar, na medida do possível, os horários em que os equipamentos ou sistemas estejam com a maior carga.
 - Convencie um nome para cada local e indique no roteiro. Isto fará com que os relatórios técnicos fiquem mais claros .
 - Oriente o que inspecionar em cada local.
 - Identifique os Painéis e Equipamentos. Isto também trará o benefício citado com a convenção dos nomes dos locais.
- c. Simulação de cargas: Quando viável, planeje a simulação de cargas, ou seja, ligue os sistemas de ar condicionado, máquinas de grande consumo, etc.
- d. Acompanhamento: Defina antecipadamente a pessoa que irá acompanhar os serviços de inspeção termográfica. Informe-o ao máximo que puder sobre inspeção termográfica e sobre o roteiro a ser seguido.
- e. Preparativos dos locais e equipamentos a serem inspecionados: Os aparelhos de termografia detectam apenas temperaturas superficiais, portanto é importante tomar as seguintes providencias antecipadamente:
 - Retirar barreiras, tampas ou portas que impeçam a visualização dos pontos a serem inspecionados.
 - Alguns disjuntores são instalados de forma que as portas somente podem ser abertas quando os disjuntores são desligados. Ao se pensar nisto o disjuntor deve ser desligado antecipadamente de forma mais conveniente.
 - Muitos painéis têm instalados barreiras de acrílico para segurança contra contatos eventuais de pessoas, e então também devem ser removidos para inspeção.
- f. Equipamentos instalados ao tempo: Os equipamentos instalados ao tempo, tais como subestações e linhas aéreas devem ser inspecionados, preferencialmente, em horários em que não haja incidência de raios solares.

- g. Carregamento de sistemas elétricos: A temperatura de uma conexão deficiente aumenta com o quadrado da corrente. Os circuitos devem estar carregados com pelo menos 30% das cargas.

Ultra-som

E o que é ultra-som?

O som audível pelo ouvido humano está compreendido entre as frequências de 20 a 20.000Hz.

Alguns animais são capazes de ouvir ultra-sons. É o caso dos cães, que chegam a perceber sons com 25.000 vibrações por segundo (25kHz). Os morcegos captam sons de até 50.000 vibrações por segundo (50kHz).

Os sons com frequências **abaixo** de 20 Hz são chamados **de infra-sons**. Os sons com frequência **acima** de 20.000Hz são chamados de **ultra-sons**.

Vantagens e desvantagens do ensaio por ultra-som

O ensaio por ultra-som, comparado com outros métodos não destrutivos, apresenta as seguintes vantagens:

- localização precisa das discontinuidades existentes nas peças, sem processos intermediários, como, por exemplo, a revelação de filmes;
- alta sensibilidade ao detectar pequenas discontinuidades;
- maior penetração para detectar discontinuidades internas na peça;
- respostas imediatas pelo uso de equipamento eletrônico.

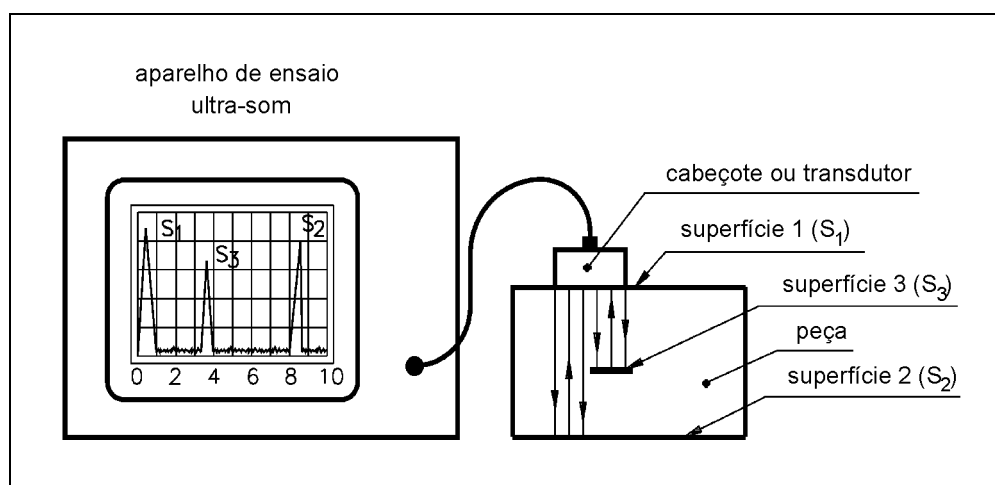
Como desvantagens podemos citar:

- exigência de bons conhecimentos técnicos do operador;
- atenção durante todo o ensaio;
- obediência a padrões para calibração do equipamento;
- necessidade de aplicar substâncias que façam a ligação entre o equipamento de ensaio e a peça (acoplantes).

Aplicando o ultra-som

O uso do ultra-som como ensaio não destrutivo é largamente difundido nas indústrias para detectar descontinuidades em todo o volume do material a analisar, tanto em metais (ferrosos ou não ferrosos) como em não metais.

O ensaio consiste em fazer com que o ultra-som, emitido por um **transdutor**, percorra o material a ser ensaiado, efetuando-se a verificação dos ecos recebidos de volta, pelo mesmo ou por outro transdutor.



Esquema básico: Ultra-som

O que é transdutor?

Transdutor, também conhecido como cabeçote, é todo dispositivo que converte um tipo de energia em outro. Conhecemos vários tipos de transdutores, entre eles o microfone e o alto-falante.

No ensaio de ultra-som, os transdutores são necessários para converter energia elétrica em energia mecânica de vibração (ultra-som) e vice-versa.

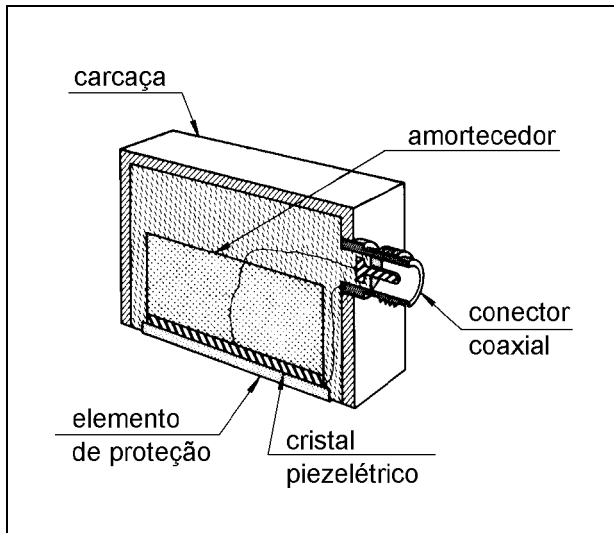
Parâmetros dos transdutores

No ensaio por ultra-som, existe grande variedade de transdutores para atender a diversas aplicações.

São subdivididos em categorias: quanto ao ângulo de emissão/recepção do ultra-som e quanto à função (emissor ou receptor ou emissor/receptor).

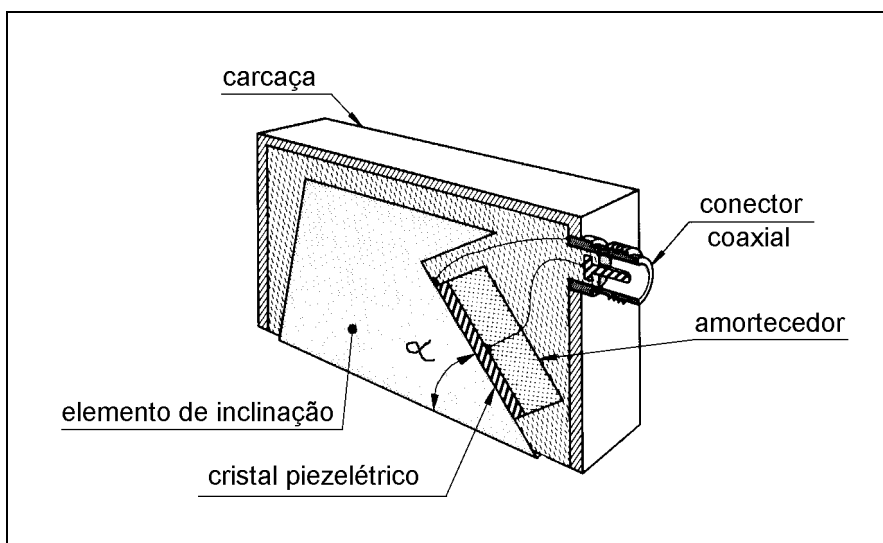
Quanto ao ângulo de emissão/recepção do ultra-som os transdutores podem ser:

- **Normais:** emitem e/ou recebem o ultra-som perpendicularmente à sua superfície.



Transdutor normal – monocristal

- **Angulares:** emitem e/ou recebem o ultra-som obliquamente à sua superfície.

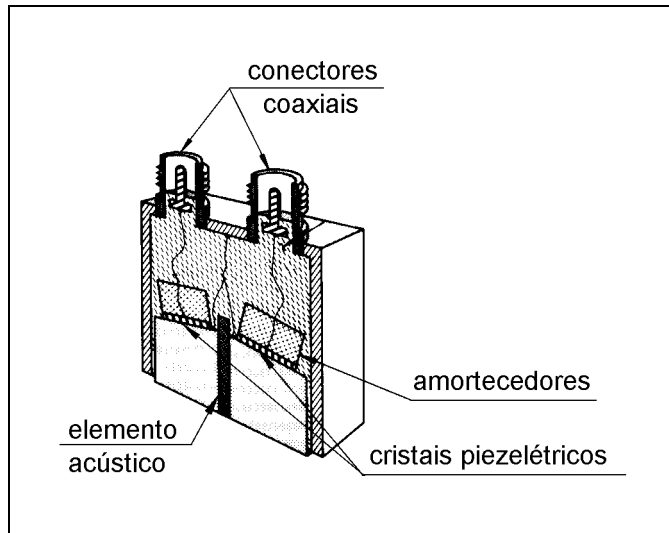


Transdutor angular - monocristal

Quanto à função, os transdutores podem ser:

- **Monocristal:** possuem apenas um cristal piezelétrico. Há três modalidades:
 - só emissor de ondas ultra-sônicas;
 - só receptor de ondas ultra-sônicas (este tipo deve trabalhar junto com o primeiro);

- emissor e receptor de ondas ultra-sônicas (o mesmo cristal emite e recebe os ecos ultra-sônicos de maneira sincronizada).
- **Duplo cristal:** o mesmo transdutor possui um cristal para recepção e outro para emissão do ultra-som.



Transdutor normal – duplo cristal

Características dos transdutores

Os elementos que caracterizam os transdutores são:

- **Tamanho do cristal piezelétrico:** os transdutores normais mais utilizados possuem de 5 a 25mm de diâmetro. Em geral, nos transdutores angulares utilizam-se cristais retangulares.
- **Freqüência:** devido às diferentes aplicações, existem transdutores com freqüência de 0,5 a 25MHz. Os mais usuais vão de 1 a 6MHz.
- **Amortecimento mecânico:** o elemento amortecedor suprime no transdutor todas as vibrações indesejáveis do cristal.
- **Face protetora:** são elementos de contato com a peça. Em geral, são películas de material plástico.
- **Carcaça:** elemento com forma apropriada para acomodar todo o conjunto e, ao mesmo tempo, facilitar seu manuseio.
- **Elementos elétricos:** são contatos elétricos ligando o cristal piezelétrico ao elemento de engate do cabo coaxial e à bobina geradora de freqüência.

Acoplante

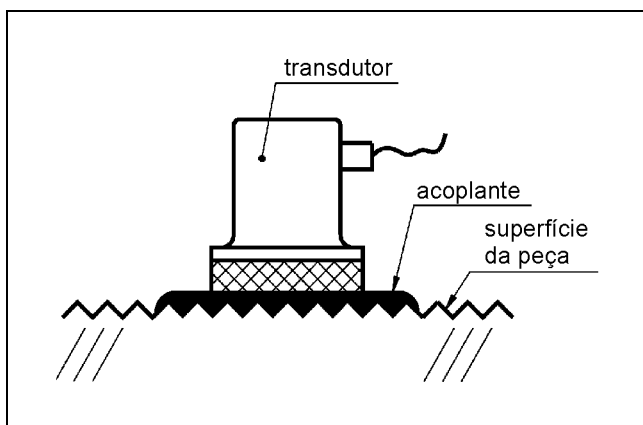
Como o ultra-som deve passar do transdutor para a peça com o mínimo de interferência, há necessidade de colocar um elemento, o acoplante, que faça esta ligação, evitando o mau contato.

Este acoplante pode ser óleo, água, glicerina, graxa etc.

Método de ensaio

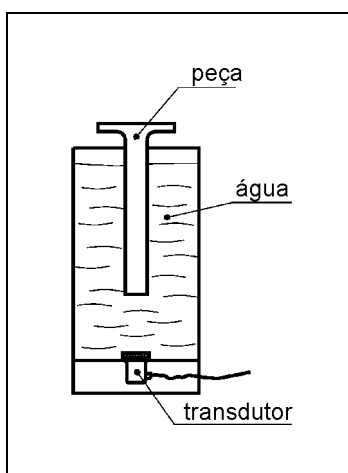
Quanto ao tipo de acoplamento, o ensaio por ultra-som pode ser classificado em dois grupos:

- **Ensaio por contato direto:** o acoplante é colocado em pequena quantidade entre a peça e o cabeçote, formando uma película.

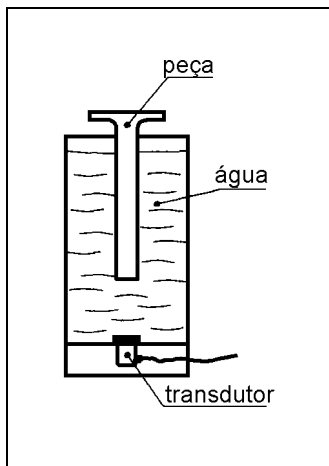


Acoplamento peça-transdutor

- **Ensaio por imersão:** a peça e o cabeçote são mergulhados num líquido, geralmente água, obtendo-se um acoplamento perfeito.



A aplicação deste método requer a construção de dispositivos adaptados ao tipo de peça a ensaiar.



Agora você já sabe o que é uma onda sonora, como as ondas se propagam, o que é o ultra-som, os tipos de transdutores e as técnicas de acoplamento, o próximo passo é a realização do ensaio.

Realizando o ensaio de ultra-som

No capítulo anterior, você ficou sabendo que o ultra-som é uma onda mecânica que se propaga de uma **fonte emissora** até uma **fonte receptora**, através de um meio físico.

Viu também que a velocidade de propagação depende do meio e do tipo de onda emitido (longitudinal ou transversal). E ficou conhecendo alguns tipos de **transdutores**, que são elementos fundamentais no ensaio, pois têm a função de receber o sinal elétrico do aparelho e converter esse sinal em energia mecânica de vibração, produzindo o ultra-som e vice-versa.

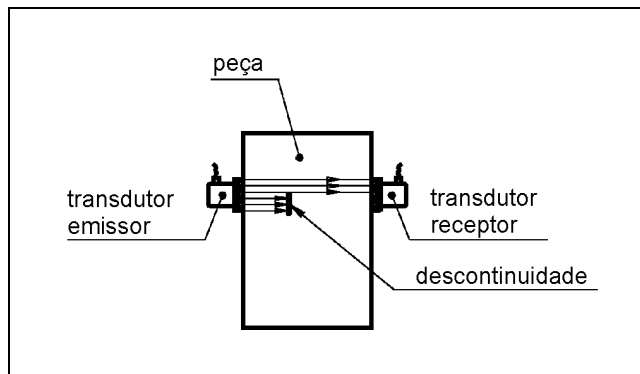
Agora, vamos completar nosso estudo conhecendo um pouco mais sobre as técnicas de ensaios.

Técnicas de ensaio

Pelo tipo de transdutor utilizado, podemos classificar o ensaio por ultra-som em quatro técnicas: por transparência, por pulso-eco, por duplo cristal e por transdutores angulares.

Técnica da transparência

Observe a figura abaixo.



Não havendo descontinuidades no material, o receptor recebe aproximadamente 100% do sinal emitido.

Havendo descontinuidades, o receptor recebe uma porcentagem inferior ao sinal emitido.

Esta técnica é mais indicada para processos automáticos que envolvem grandes produções.

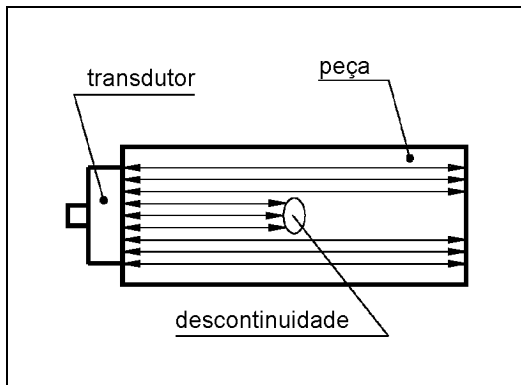
Ela não é apropriada para processos de medições manuais, por diversas razões:

- cansaço em segurar dois cabeçotes;
- a face posterior da peça pode ser inacessível;
- dificuldade de bom acoplamento dos dois lados;
- dificuldade de posicionar corretamente os dois cabeçotes;
- dificuldade em manusear o equipamento e os dois cabeçotes ao mesmo tempo.

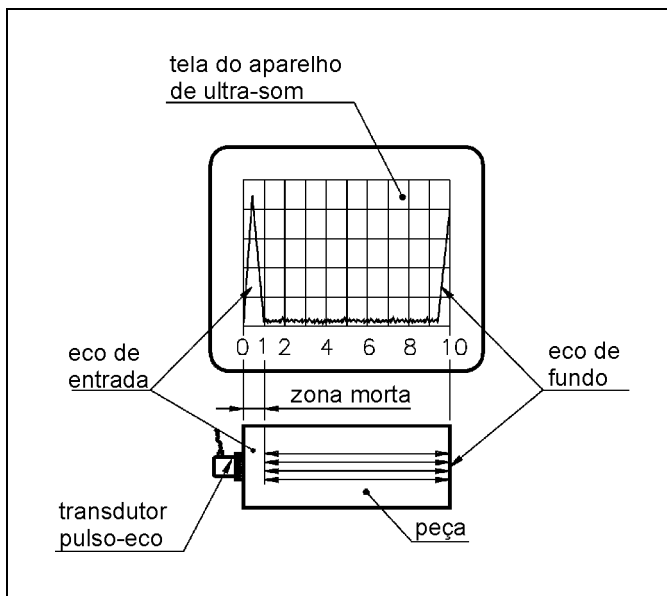
Técnica por pulso-eco

Nos ensaios por ultra-som em processos manuais, geralmente usamos os transdutores do tipo monocristal, emissor e receptor (pulso-eco), pela facilidade de manuseio e de operação.

É possível fazer uma medição precisa quando o transdutor não está emitindo sinal durante a chegada de um eco. Neste caso, as ondas ultra-sônicas têm de ser pulsantes para que o cristal possa receber os ecos de retorno nos intervalos de pulsação.



É fácil entender que, se o pulso emissor bater numa descontinuidade muito próxima da superfície, haverá um eco retornando, antes de terminar a emissão. Neste caso, o sinal da descontinuidade não é percebido.



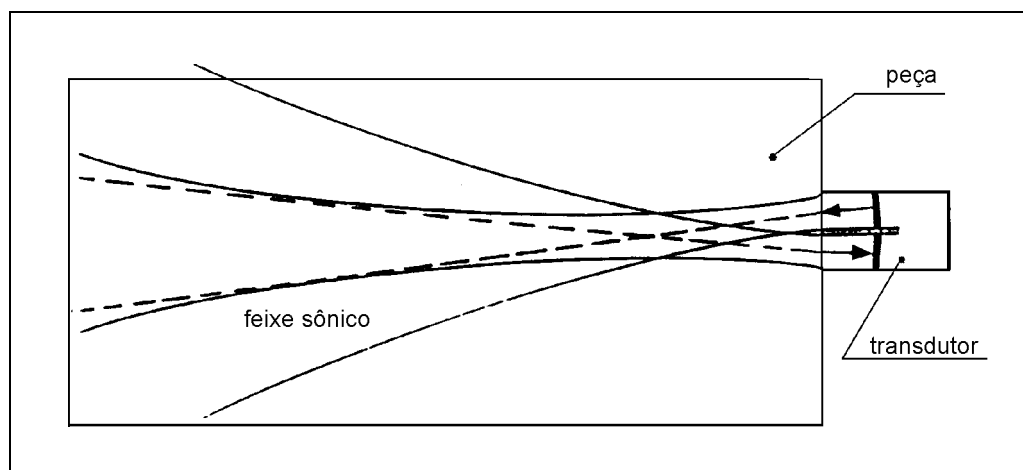
Zona morta do transdutor pulso-eco

Zona morta é a área próxima da superfície na qual não se detectam ecos durante o tempo de emissão.

Técnica do duplo cristal

Para ensaiar peças com pouca espessura, nas quais se espera encontrar descontinuidades próximas à superfície, os transdutores pulso-eco não são adequados, pelos motivos já vistos.

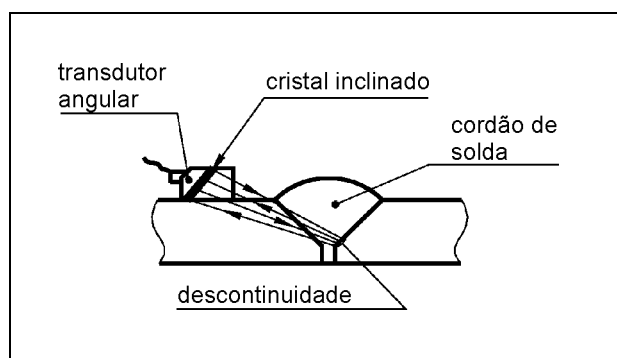
Neste caso, usamos outro tipo de transdutor – o **transmissor e receptor (TR)**, por **duplo cristal**. A zona morta, neste caso, é menor.



Os transdutores TR são usados freqüentemente para verificar dimensões de materiais e detectar, localizar e avaliar falhas subsuperficiais.

Técnica com transdutores angulares

Imagine a colocação de qualquer dos transdutores vistos anteriormente sobre um cordão de solda. Não teríamos acoplamento suficiente para o ensaio.



Neste caso, usamos os transdutores angulares, que possibilitam um acoplamento perfeito e a detecção das descontinuidades.

Equipamento de ensaio por ultra-som

No ensaio, o que nos interessa é medir a intensidade do sinal elétrico de retorno (tensão), recebido pelo transdutor, e o tempo transcorrido entre a emissão do pulso e o retorno do eco.

Imagine que você tenha em mãos uma chapa de aço com 50mm de espessura e precise medir o tempo que o som leva para percorrer o caminho de ida e volta através dessa espessura.

Sabendo que:

espessura (e) = 0,050m

velocidade de propagação do som no aço (v) = 5.920m/s

$$\text{tempo (t)} = 2 \times \frac{e}{v} \quad t = 2 \times \frac{0,050\text{m}}{5.920\text{m/s}} \quad t = 0,0000168\text{s} \text{ ou } t = 16,8\mu\text{s}$$

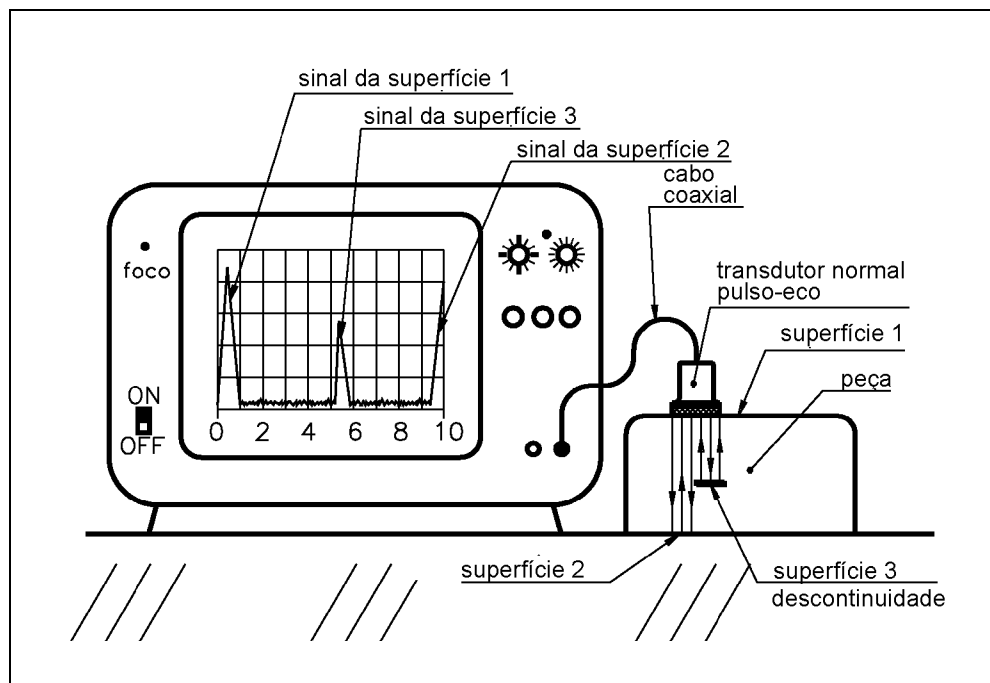
μs = microsegundos

Como você mediria esse tempo tão pequeno?

O equipamento que realiza tais medidas no ensaio por ultra-som é um tipo de **osciloscópio**. Os sinais elétricos recebidos do transdutor são tratados eletronicamente no aparelho e mostrados numa tela, a partir da qual o técnico em ultra-som interpreta os resultados.

Na tela, vemos na vertical a intensidade do sinal elétrico de saída do eco e de retorno e, na horizontal, o intervalo entre a emissão e a recepção do pulso.

Além de operar como osciloscópio, efetuando medições (fonte receptora), o aparelho possui também uma fonte emissora de sinais elétricos, para gerar o ultra-som através dos transdutores.



Esquema básico de resposta obtida no ensaio de ultra-som

Na prática, o valor numérico dessas medidas propriamente ditas não nos interessa, pois trabalhamos por meio de comparações. Comparamos as alturas e as distâncias entre os pulsos na tela com outros conhecidos, ajustados previamente na calibração do equipamento. Vejamos o que isso significa.

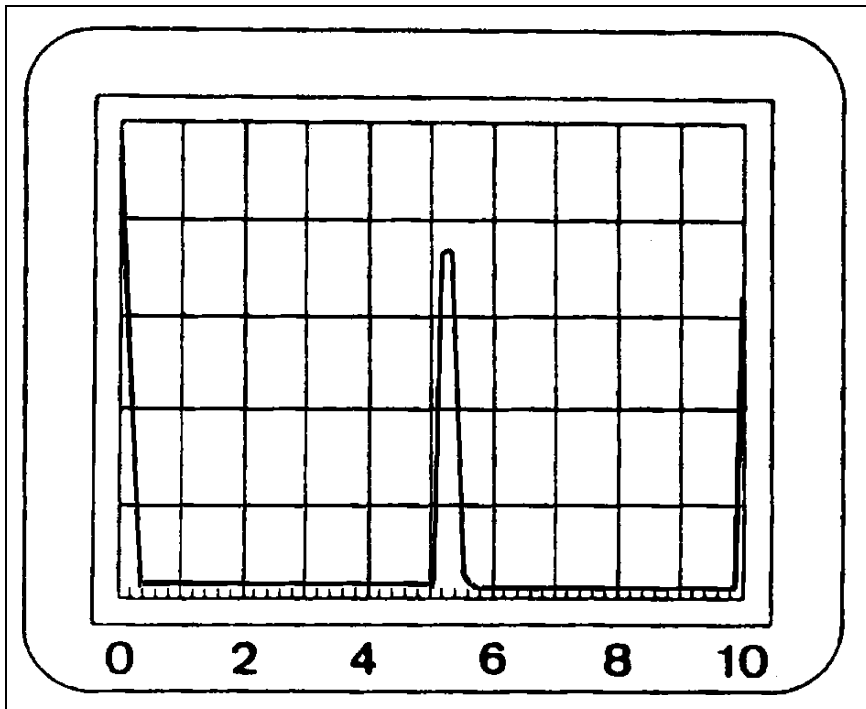
Tomemos novamente o exemplo da chapa de aço com 50mm de espessura. O procedimento para acerto da escala da tela consiste em ajustar as 10 divisões horizontais da tela, a partir de um padrão confeccionado do mesmo tipo de material a ser ensaiado.

Neste caso, usaremos um bloco de aço, que apresenta uma das suas dimensões equivalente a 100mm. Portanto, cada divisão da tela terá 10mm ($100\text{mm}/10$ divisões = 10mm por divisão).

Logo, o valor do tempo ($16,8\mu\text{s}$) não nos interessa, mas sim que este tempo é relativo a 50mm de peça, isto é, a distância entre o pulso de saída e o de retorno na tela, corresponde a 50mm.

Sendo nossa escala de 0 a 100mm, o pulso de resposta da parede oposta da chapa – **eco de fundo** – aparecerá na tela na quinta divisão. Como a espessura cabe duas vezes na tela ajustada para 100mm, aparecerá mais um pulso na décima divisão.

Essa é a metodologia utilizada para o ajuste da escala.



Tela com escala de 10 divisões

Observe que os pulsos, embora sejam da mesma superfície refletora, diminuem de tamanho. Essa atenuação é causada pela distância que o som percorre no material, ou seja, quanto maior a distância percorrida dentro da peça, menor a intensidade do sinal de retorno, devido aos desvios e absorção do ultra-som pelo material.

Medição de espessura com o ultra-som

Em muitas situações a espessura do material define a condição de um componente ou do próprio equipamento. Exemplos típicos são a espessura de uma chapa de um vaso de pressão, a espessura da parede de uma carcaça de bomba e a espessura de paredes de tubulações.

Os três exemplos acima, encontrados na maioria das indústrias, apresentam requisitos diferentes para a medição e acompanhamento da espessura.

Na medição de espessura podem ser utilizados equipamentos convencionais , tais como paquímetros e micrômetros, mas em peças de grande porte oo peças cujo o acesso é impossível para instrumentos convencionais é utilizado a medição de espessura por ultra-som.

O uso do ultra-som permite que a medição seja feita a partir de um só lado, permitindo que o seja feita as medidas mais rapidamente e com maior precisão.

Análise de óleos lubrificantes

As análises físico químicas de óleos lubrificantes e a ferrografia são técnicas complementares de manutenção preditiva para equipamentos que trabalham com óleos para lubrificação de mancais, engrenagens e circuitos hidráulicos.

O acompanhamento das características de especificação do óleo lubrificante e a análise das partículas de desgaste e de contaminação são de fundamental importância.

A viscosidade, o PH, o aspecto visual (cor e espuma), a contaminação por água e outros elementos metálicos ou não metálicos, o tipo e a quantidade de aditivos, o teste de RBOT (taxa de oxidação por bomba rotativa) são algumas características que podem ser acompanhadas através de um simples kit de ensaio e/ou através de laboratórios especializados;

A Ferrografia é a técnica de análise de óleos lubrificantes e de graxas para a análise de partículas de desgaste. O princípio básico de seu funcionamento é através da análise da deposição de partículas de desgaste, metálicas ou não metálicas, que se depositam devido aos efeitos de um campo magnético e gravimétrico.

Coletas de amostras de lubrificantes

Para se coletar uma amostra de lubrificante em serviço, deve-se escolher criteriosamente o ponto de coleta; o volume a ser colhido e qual método deverá ser utilizado na coleta.

Escolha do ponto de coleta

As partículas que interessam para a análise são aquelas geradas recentemente. Considerando este pré-requisito, o ponto de coleta deverá ser aquele em que uma grande quantidade de partículas novas estejam em região de grande agitação.

Exemplos

- Tubulação geral de retorno do lubrificante para o reservatório;
- Janela de inspeção de reservatório, próximo à tubulação de descarga;
- Drenos laterais em reservatórios ou cárteres;
- Dreno geral de reservatório ou cárteres, em região de agitação,
- Varetas de nível.

Pontos após filtros ou após chicanas de reservatórios devem ser evitados, pois esses elementos retiram ou precipitam as partículas do lubrificante.

Volume de amostra

São necessários apenas 100ml de amostra, que é colocada em um frasco com capacidade para 150ml. Excesso de lubrificante, após a coleta, deve ser descartado imediatamente, para evitar que as partículas se precipitem. O espaço de 50ml, que corresponde a 1/3 do frasco, é deixado vazio para permitir uma agitação posterior da amostra.

Métodos de coleta

Os principais métodos de coleta de lubrificantes envolvem válvulas de coleta, bombas de coleta e imersão.

Se a máquina estiver dotada de válvulas de coletas, o método de coleta deverá passar pela seguinte seqüência:

- Limpar a região da coleta;
- Abrir a válvula permitindo uma vazão razoável para arrastar as partículas (filete de 1/4" a 2", proporcional à máquina);
- Purgar 2 a 3 vezes o volume parado na tubulação da válvula;
- Retirar o frasco quando completar o nível de coleta nele indicado;
- Fechar a válvula (nunca abri-la ou fechá-la sobre o frasco);
- Descartar imediatamente o lubrificante que excedeu o nível de coleta;
- Limpar o frasco;
- Identificar a amostra com os seguintes dados: máquina, ponto de coleta, empresa e data.

Se o lubrificante estiver em constante agitação, a amostra poderá ser coletada pelo método de imersão que consiste em mergulhar o frasco no lubrificante. Em casos de temperaturas elevadas o frasco é fixado em um cabo dotado de braçadeiras. Esse cuidado é necessário para evitar queimaduras no operador.

A seqüência para aplicar o método da imersão consiste nos seguintes passos:

- Destampar o frasco e prendê-lo no suporte com braçadeiras;
- Introduzir o frasco no reservatório ou canal de lubrificante, com a boca para baixo, até que o nível médio do lubrificante seja alcançado, sem tocar no fundo do reservatório ou canal; Virar o frasco para cima, permitindo a entrada do lubrificante;
- Descartar imediatamente o excesso de lubrificante que exceder o nível de coleta;
- Tampar o frasco com batoque plástico e tampa roscada;
- Limpar o frasco;
- Identificar a amostra com os seguintes dados: máquina, ponto de coleta, empresa, data.

Análise de lubrificantes por meio da técnica ferrográfica

Uma fresadora CNC foi vistoriada pela equipe de manutenção da empresa e o líder da equipe ficou encarregado de efetuar a coleta de amostra do óleo lubrificante da máquina para uma ferrografia, pois era preciso constatar a ocorrência de desgaste de alguns componentes de funções importantes.

Como o líder coletou a amostra de óleo? Como o exame de um óleo permite detectar desgastes? O que é exame ferrográfico?

Conceito da ferrografia

A ferrografia é uma técnica de avaliação das condições de desgaste dos componentes de uma máquina por meio da quantificação e observação das partículas em suspensão no lubrificante.

Essa técnica satisfaz todos os requisitos exigidos pela manutenção preditiva e também pode ser empregada na análise de falhas e na avaliação rápida do desempenho de lubrificantes.

Origem da ferrografia

A ferrografia foi descoberta em 1971 por Vernon C. Westcott, um tribologista de Massachusetts, Estados Unidos, e desenvolvida durante os anos subsequentes com a colaboração de Roderic Bowen e patrocínio do Centro de Engenharia Aeronaval Americano e outras entidades.

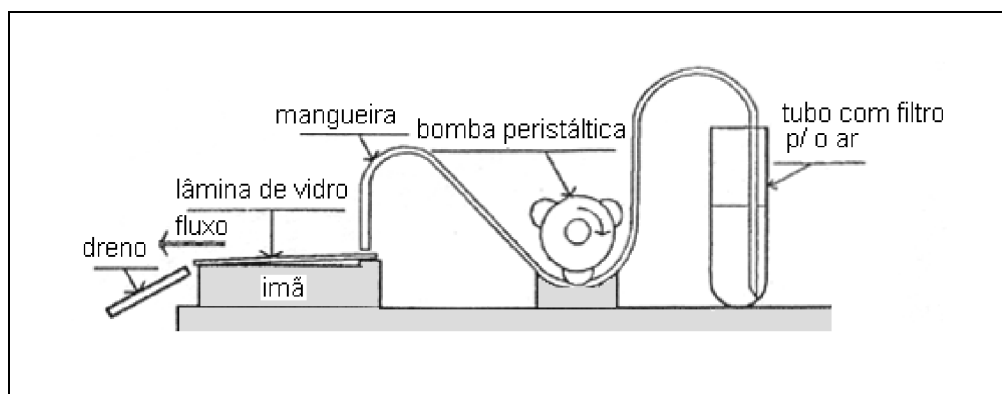
O objetivo inicialmente proposto foi o de quantificar a severidade do desgaste de máquinas e para a pesquisa foram adotadas as seguintes premissas:

1. Toda máquina desgasta-se antes de falhar.
2. desgaste gera partículas.
3. A quantidade e o tamanho das partículas são diretamente proporcionais à severidade do desgaste que pode ser constatado mesmo a olho nu.
4. Os componentes de máquinas, que sofrem atrito, geralmente são lubrificados e as partículas permanecem em suspensão durante um certo tempo.
5. Considerando que as máquinas e seus elementos são constituídos basicamente de ligas de ferro, a maior parte das partículas provém dessas ligas.

A técnica ferrográfica

O método usual de quantificação da concentração de material particulado consiste na contagem das partículas depositadas em papel de filtro e observadas em microscópio. Este método, porém, não proporciona condições adequadas para a classificação dimensional, que é de grande importância para a avaliação da intensidade do desgaste de máquinas.

Orientando-se pela quinta premissa, ou seja, de que há predominância de ligas ferrosas nas máquinas e seus elementos, Westcott inventou um aparelho para separar as partículas de acordo com o tamanho. O aparelho chama-se ferrógrafo.



Funcionamento do ferrógrafo

Acompanhando a figura anterior, o ferrógrafo de Westcott é constituído de um tubo de ensaio, uma bomba peristáltica, uma mangueira, uma lâmina de vidro, um imã e um dreno.

A bomba peristáltica, atuando na mangueira, faz com que o lubrificante se desloque do tubo de ensaio em direção à lâmina de vidro, que se encontra ligeiramente inclinada e apoiada sobre um imã com forte campo magnético. A inclinação da lâmina de vidro garantirá que o fluxo do lubrificante tenha apenas uma direção.

O lubrificante, do tubo de ensaio até a extremidade final da mangueira, transporta partículas grandes e pequenas com a mesma velocidade. Quando o fluxo passa sobre a lâmina de vidro, a velocidade de imersão ou afundamento das partículas grandes passa a ser maior que a velocidade das pequenas. Isto ocorre devido à ação do campo magnético do imã. Nesse momento, começa a separação entre partículas grandes e pequenas.

As partículas grandes vão se fixando na lâmina de vidro logo no seu início, e as menores depositam-se mais abaixo.

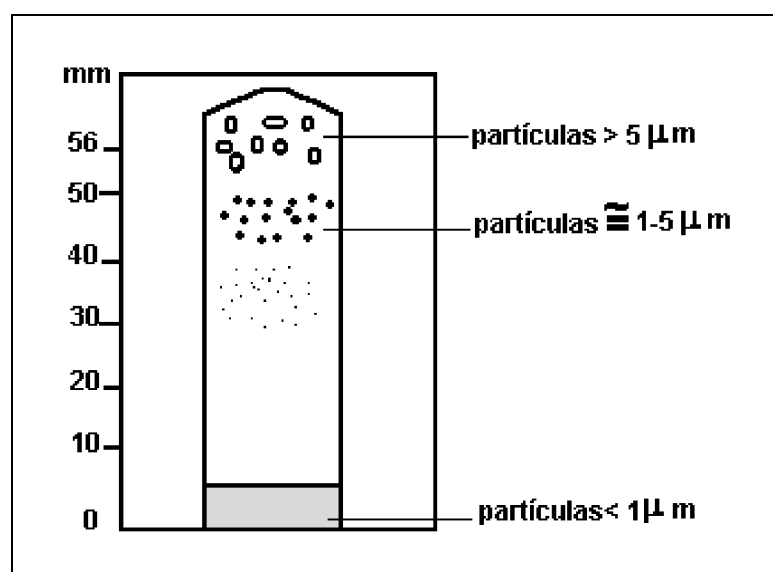
Com esse ferrógrafo, constatou-se que as partículas maiores que $5\mu\text{m}$ fixam-se no início da placa de vidro e que as partículas entre $1\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$ fixam-se seis milímetros abaixo. Essas posições têm grande importância, pois as partículas provenientes de desgastes severos geralmente apresentam dimensões com mais de $15\mu\text{m}$, enquanto as partículas provenientes de desgastes normais apresentam dimensões ao redor de $1\mu\text{m}$ a $2\mu\text{m}$.

O dimensionamento de partículas é efetuado com o auxílio de um microscópio de alta resolução.

Muitas tentativas foram feitas até se obter a vazão de fluido e o imã mais adequados. Nos ferrógrafos atuais, a vazão é de 0,3ml de fluido por minuto e 98% das partículas ficam retidas na lâmina de vidro, mesmo as não magnéticas.

Ferrograma

A figura seguinte mostra um ferrograma, isto é, uma lâmina preparada que permite obter a dimensão aproximada de partículas depositadas. A lâmina mede aproximadamente 57mm. Ao longo dela passa o fluxo de lubrificante que vai deixando as partículas atrás de si. Como foi dito, as maiores ficam no início do fluxo e as menores no final.



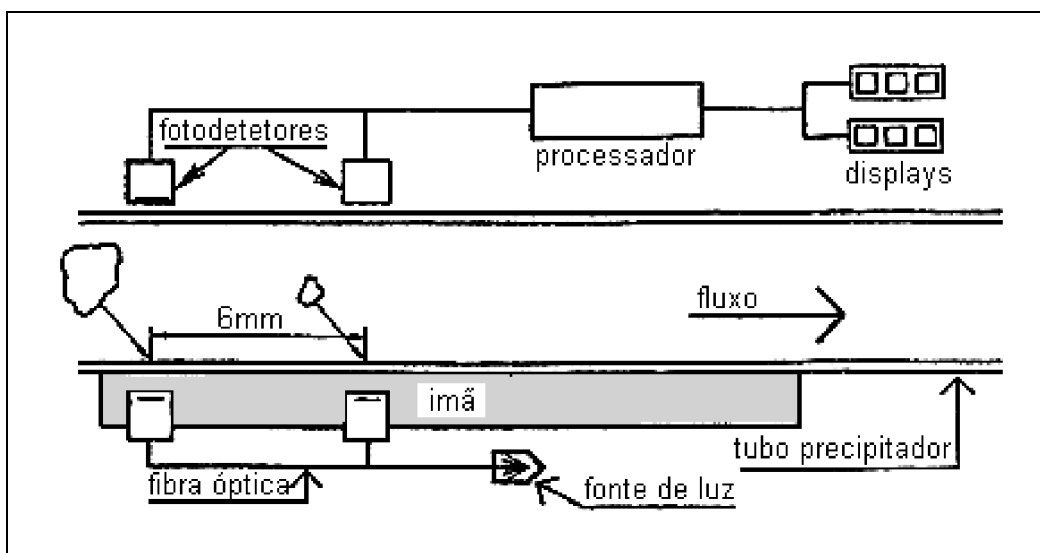
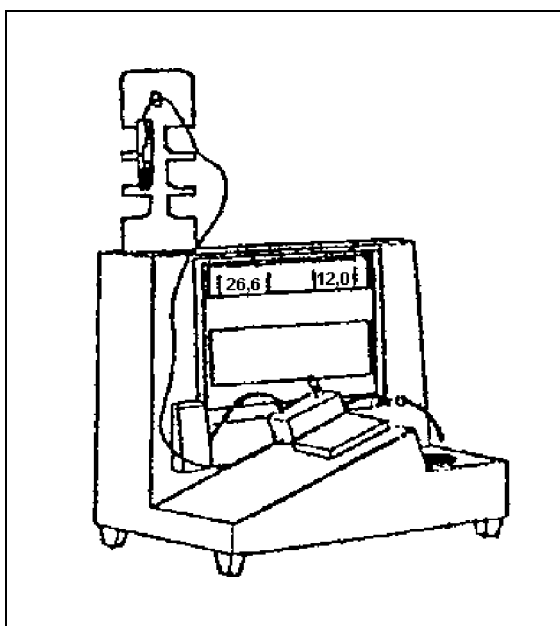
As partículas não magnéticas, como as provenientes de cobre e suas ligas, alumínio e suas ligas, cromo e suas ligas, compostos orgânicos, areia etc, também depositam-se no ferrograma. Isto é explicável pela ação da gravidade, auxiliada pela lentidão do fluxo, além de algum magnetismo adquirido pelo atrito desses materiais com partículas de ligas de ferro.

As partículas não magnéticas distinguem-se das partículas de ligas ferrosas pela disposição que as primeiras assumem no ferrograma. No ferrograma as partículas de materiais não magnéticos depositam-se aleatoriamente, sem serem alinhadas pelo campo magnético do imã.

Uma outra importante utilidade do ferrograma é que ele permite descobrir as causas dos desgastes: deslizamento, fadiga, excesso de cargas etc. Essas causas geram partículas de forma e cores específicas, como se fossem impressões digitais deixadas na vítima pelo criminoso.

Ferrografia quantitativa

Com a evolução do ferrógrafo, chegou-se ao ferrógrafo de leitura direta, que permite quantificar as partículas grandes e pequenas de modo rápido e objetivo. Seu princípio é o mesmo adotado nas pesquisas com ferrogramas e encontra-se esquematizado a seguir.

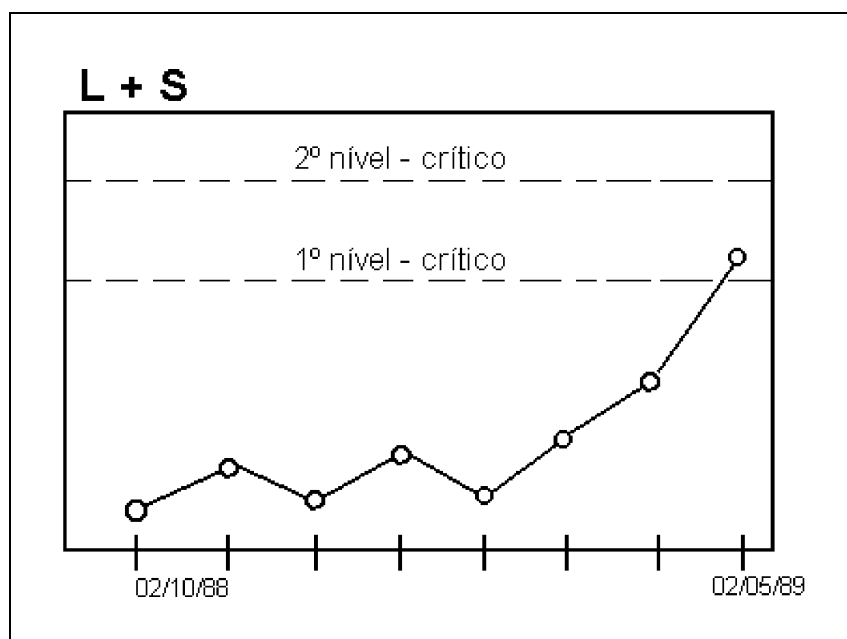


A luz proveniente da fonte, divide-se em dois feixes que passam por uma fibra óptica. Esses feixes são parcialmente atenuados pelas partículas nas posições de entrada e seis milímetros abaixo. Os dois feixes atenuados são captados por sensores ópticos ou fotodetecores que mandam sinais para um processador, e os resultados são mostrados digitalmente em um *display* de cristal líquido. Os valores encontrados são

comparados com os valores obtidos por um ensaio sobre uma lâmina limpa, considerando que a diferença de atenuações da luz é proporcional à quantidade de partículas presentes.

O campo de medição vai de 0 a 190 unidades DR (*Direct Reading* = Leitura Direta), mas é linear apenas até 100. A partir deste valor, as partículas empilham-se umas as outras, acarretando leituras menores que as reais. Por isso, muitas vezes é necessário diluir o lubrificante original para se manter a linearidade.

O acompanhamento da máquina, por meio da ferrografia quantitativa, possibilita a construção de gráficos, e as condições de maior severidade são definidas depois de efetuadas algumas medições. Os resultados obtidos são tratados estaticamente. Por exemplo, o gráfico a seguir, chamado de gráfico de tendências, é obtido por meio da ferrografia quantitativa.



O valor L + S, chamado concentração total de partículas, é um dos parâmetros utilizados para avaliação do desgaste.

Significados:

L - (abreviatura de *large*, que significa grande) corresponde ao valor encontrado de partículas grandes ($> 5\mu\text{m}$).

S - (abreviatura de *small*, que significa pequeno) corresponde ao valor encontrado de partículas pequenas ($> 5\mu\text{m}$).

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 concentração de partículas da amostra.

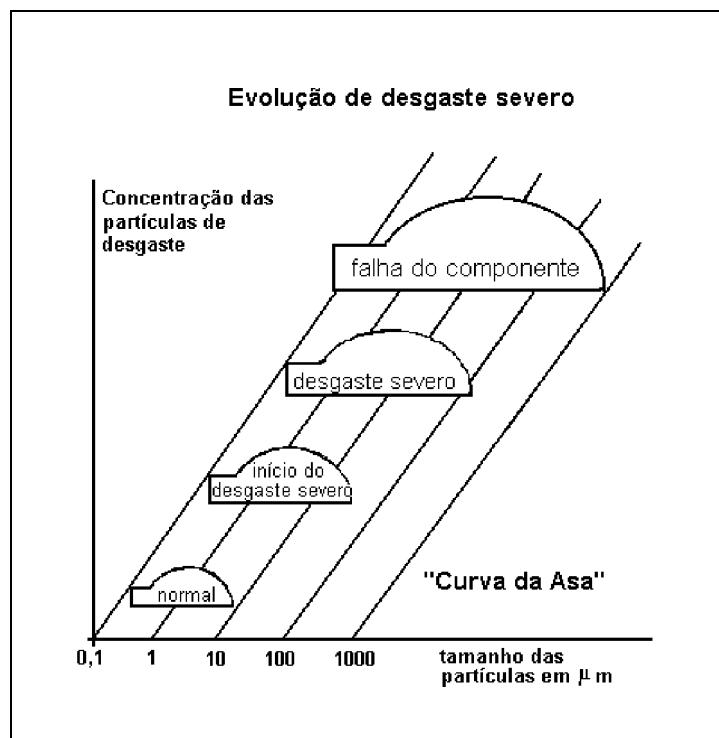
O manuseio dos valores de L e S permitem várias interpretações, tais como:

$$\begin{aligned} L + S &= \text{concentração total de partículas.} \\ \text{PLP} &= (L - S) / (L + S) * 100 = \text{modo de desgaste.} \\ \text{IS} &= (L2 - S2) \text{ diluição} = \text{índice de severidade.} \end{aligned}$$

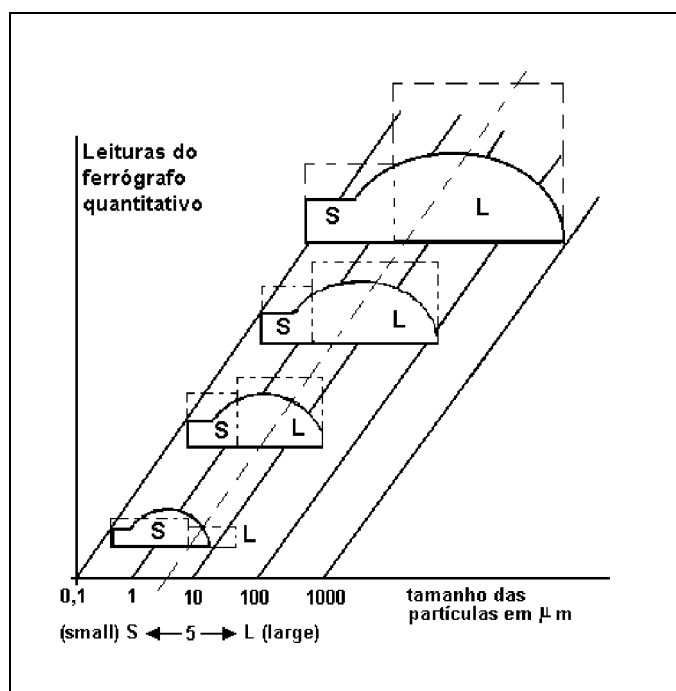
Significado do gráfico

Os resultados obtidos com a ferrografia quantitativa são utilizados principalmente na análise de tendências.

O gráfico a seguir, chamado "curva de asa", mostra a evolução do desgaste dos elementos de um máquina. Observe que o tamanho das partículas provenientes de desgaste normal varia de 0,1µm até aproximadamente 5µm. A presença de partículas maiores praticamente garantir a indesejável falha do componente.



Para maior clareza, observe o gráfico seguinte que mostra as faixas limítrofes dos tamanhos das partículas.





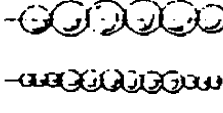



Ferrografia analítica

A identificação das causas de desgaste é feita por meio do exame visual da morfologia, cor das partículas, verificação de tamanhos, distribuição e concentração no ferrograma.

Pela ferrografia analítica, faz-se a classificação das partículas de desgaste em cinco grupos. O quadro a seguir mostra os cinco grupos de partículas de desgaste e as causas que as originam.

Classificação das Partículas	Causas
Ferrosas	esfoliação; corte por abrasão; fadiga de rolamento; arrastamento; desgaste severo por deslizamento
Não-ferrosas	metais brancos; ligas de cobre, ligas de metal patente ou antrificação
Óxidos de ferro	óxidos vermelhos; óxidos escuros; metais oxidados escuros
Produtos da degradação do lubrificante	corrosão; polímeros de fricção
Contaminantes	poeira de estrada; pó de carvão; asbesto; material de filtro; flocos de carbono

As fotografias constituem a única forma de mostrar, com clareza, os aspectos dos ferrogramas, mas podemos esboçá-los, simplificada-mente, para registrar as informações, conforme exemplo a seguir.

Esfoliação	Corte do abrasão
 <ul style="list-style-type: none"> • Escamas • Superfície lisa • 0,5 - 5µm 	 <ul style="list-style-type: none"> • Cavacos • Existência de areia • 10 ~ 100µm
Fadiga (rolamento e engrenagem)	Arrastamento (engrenagens)
 <ul style="list-style-type: none"> • Esferas • ~ Corte reto • ~ 3µm 	 <ul style="list-style-type: none"> • Superfície rugosa • Coloração por temper. • > 20µm
Desgaste severo por deslizamento	Partículas diversas
 <ul style="list-style-type: none"> • Estrias • Corte reto • > 20µm 	 <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> Areia Polímeros de fricção </div>

Cronograma de monitoramento

Assim como em outras técnicas de Manutenção Preditiva, os primeiros exames são utilizados na determinação da referência da máquina (base-line).

Para cada tipo de máquina estabelecem-se diferentes periodicidades nos exames quantitativos (DR) e analíticos (AN). A título de exemplo, temos:

DR a cada 30 dias.

AN a cada 90 dias ou quando algo anormal é apontado pelo DR.

Nas duas primeiras amostras efetuam-se DR + AN para determinação da base-line.

Comparação com outras técnicas

Tendo sido entendido os princípios e o processo, podemos efetuar uma comparação rápida entre as técnicas atualmente disponíveis.

Análise de vibrações

A análise de vibrações é, junto com a ferrografia, a melhor associação de técnicas para monitoramento.

Considerando-se que a intensidade da vibração é diretamente proporcional à excitação (força) e ao grau de mobilidade do sistema (resiliência e folgas), pode-se concluir que, o aumento da vibração nos indicará alterações no estado da máquina.

Tomemos, para raciocínio, o monitoramento de um ventilador e dois problemas muito comuns e simples:

- **Desbalanceamento:** por um motivo qualquer, um ventilador se desbalanceia. O desequilíbrio resultará em aumento da força com conseqüente aumento da vibração. Os esforços decorrentes afetarão os mancais, desgastando-os e produzindo partículas. Estas partículas serão detectadas pela ferrografia. Mas antes que isto ocorra, o aumento da vibração pode ser acusado facilmente pela análise de vibrações, antes da ferrografia.
- **Contaminação:** imaginemos a entrada de contaminante sólido (areia) no manca. Sua presença provocará um desgaste que aumentará a folga. O aumento da folga progredirá até que, vencidos os limites de sensibilidade do medidor de vibrações Ato contínuo, a análise das vibrações indicará que temos um mancai danificado e deve ser trocado. Entretanto, a ferrografia percebe a anormalidade antes que tenhamos danos.

Conclui-se que temos uma máquina onde o uso conjunto das duas técnicas é a melhor opção.

Espectrometria

A espectrometria de absorção atômica ou de emissão ótica, em termos gerais, indicam a presença dos elementos químicos. A amostra é introduzida numa câmara de combustão e os materiais presentes são "desintegrados" até o seu nível atômico. Cada elemento químico possui frequências particulares, como "impressões digitais", tornando possível sua identificação.

Entretanto, esta técnica não consegue detectar partículas maiores que $8\mu\text{m}$ (a média de limite de detecção está em torno de $5\mu\text{m}$). Ora, se a maioria dos problemas gera partículas maiores que $15\mu\text{m}$, é fácil perceber que estamos limitados em nossa resolução.

Temos ainda o fato de que não podemos, com a espectrometria, perceber que tipo de desgaste pois não podemos visualizar as partículas.

Temos ainda uma confusão bastante comum. Imaginemos uma amostra com partículas decorrentes de *pitting* em aço de baixo teor de liga (rolamentos), espoliação em aço cementado (engrenagens), e ferrugem da carcaça. Enquanto que na Ferrografia podemos distinguir cada uma delas, o resultado espectrométrico nos indicará apenas que temos presente o elemento químico ferro.

Por outro lado, apenas com a espectrometria podemos intensificar se um certo aditivo ainda esta presente.

Concluimos que a espectrometria nos auxilia apenas quando desejamos avaliar o lubrificante em si.

Exames físico-químicos

São ensaios importantes, mas destinados apenas à avaliar as condições do lubrificante.

A medição da acidez, por exemplo, poderia nos indicar o momento de troca do óleo. São vários os casos, todavia, em que encontramos máquinas onde, apesar de ter sido dado com em boas condições, o lubrificante estava afetando a máquina com desgaste corrosivo (partículas de tom marrom, translúcidas e menores que 1µm).

São, portanto, técnicas auxiliares para a ferrografia.

Aplicações

A ferrografia vem sendo aplicada no Brasil desde 1988, cobrindo máquinas dos mais variados tipos e aplicações, lubrificadas seja por óleo ou por graxa.

As condições básicas para sua aplicação são:

- Existência de lubrificante
- Possibilidade de coleta preferencialmente com a máquina em operação.
- Possibilidade de coleta em partes da máquina com a menor interferência de contaminação possível.

Tipos de máquinas

As mais variadas aplicações e ramos de atividade se beneficiam da ferrografia.

Citamos alguns exemplos:

- Caixas de engrenagem (Redutores e Multiplicadores)
- Máquinas alternativas (Compressores e Motores a explosão, Motores hidráulicos)
- Turbo-máquinas (Turbinas e Turbo-compressores)
- Máquinas rotativas (Compressores de parafuso e Motores elétricos)
- Circuitos hidráulicos (De potência ou de controle)
- Mancais diversos (Rolamento ou Deslizamento)
- Transformadores elétricos (como técnica de apoio à cromatografia).

Existem aplicações até na área médica na avaliação de próteses ortopédicas "in vivo".

Escolha de máquinas a serem monitoradas

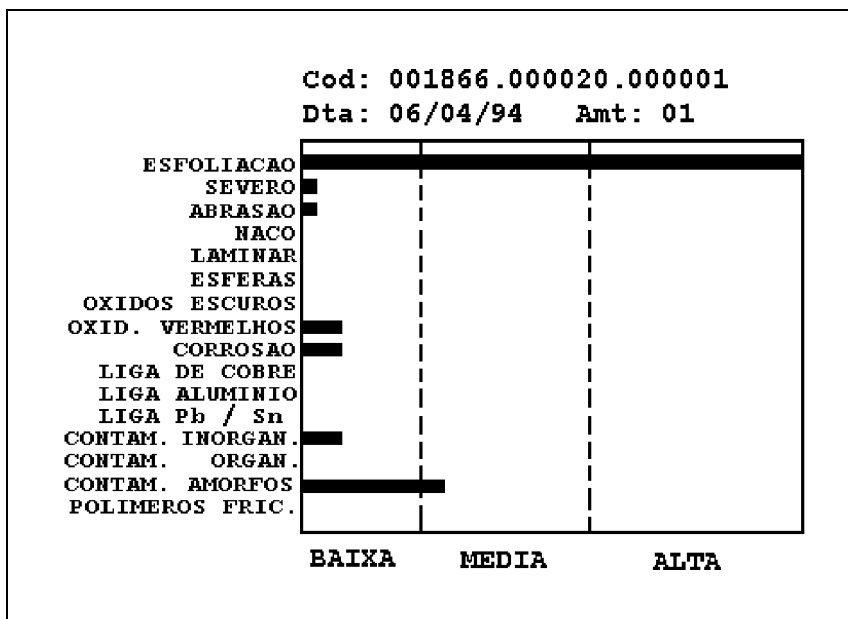
O porte da máquina não é levado em conta. Já no Brasil máquinas de poucos quilowatts a centenas de megawatts são monitoradas por ferrografia. Citamos os fatores mais importantes na determinação das máquinas a serem monitoradas:

- Custo:
 - máquinas de importância no processo produtivo.
 - máquinas que apresentam dificuldades de manutenção (acesso ou sobressalentes raros). . equipamentos cuja parada implica em perdas de matéria prima cara.
- Segurança:
 - locais onde a parada/quebra implica em risco ao patrimônio.
 - risco ao ser humano ou ambiente.
- Qualidade:
 - equipamentos cuja parada, quebra ou perda de performance afeta a qualidade do produto

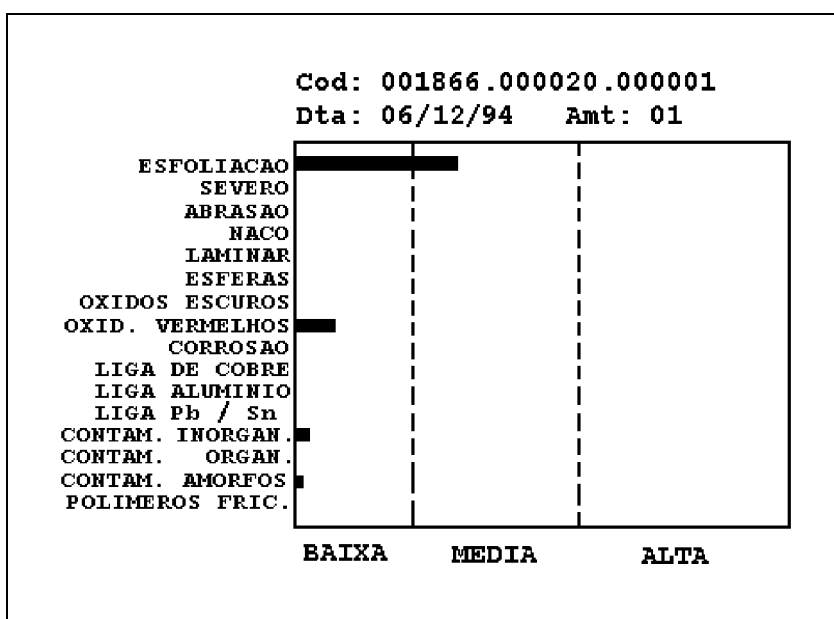
Casos históricos

Efeito da viscosidade

Redutor de velocidade de uso em equipamento ferroviário. O primeiro ferrograma indica alta concentração de partículas de Esfoliação. Com a alteração da viscosidade de ISO 150 para ISO 220 o desgaste diminuiu. O tipo de óleo e o fabricante não foram alterados.



Óleo original = ISO 150



Óleo alterado para ISO 220

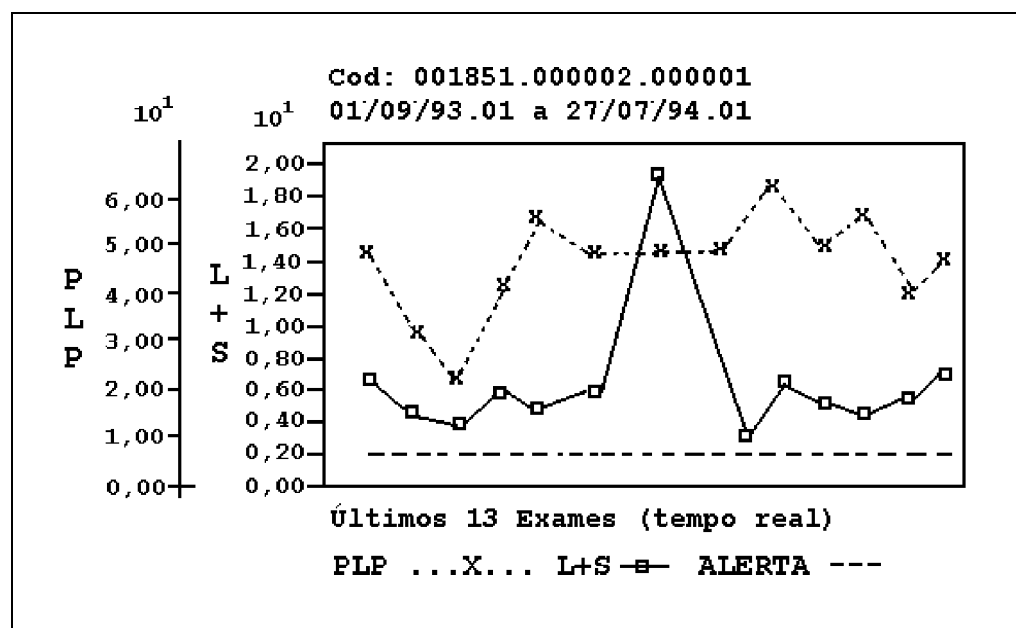
Prolongamento de vida útil

Compressor de ar tipo parafuso. O monitoramento permitiu que fosse postergada a intervenção programada regular de 10.000 horas para 26.000 horas. Cada intervenção está estimada em US\$ 18.000.

A parada para manutenção foi decidida apenas quando se observou aumento na concentração de partículas. A desmontagem confirmou problemas em rolamento e dentes de engrenagem.

Apresentamos os últimos exames que antecederam a parada para manutenção.

A unidade já vinha apresentando concentrações de partículas maiores que aquelas estabelecidas como nível de alerta. A manutenção foi postergada até o limite máximo aguardando-se uma ocasião mais oportuna para a intervenção.

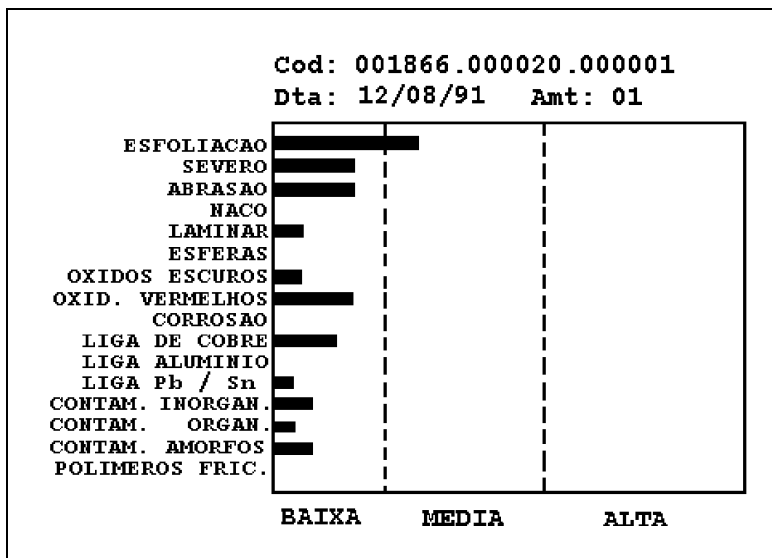
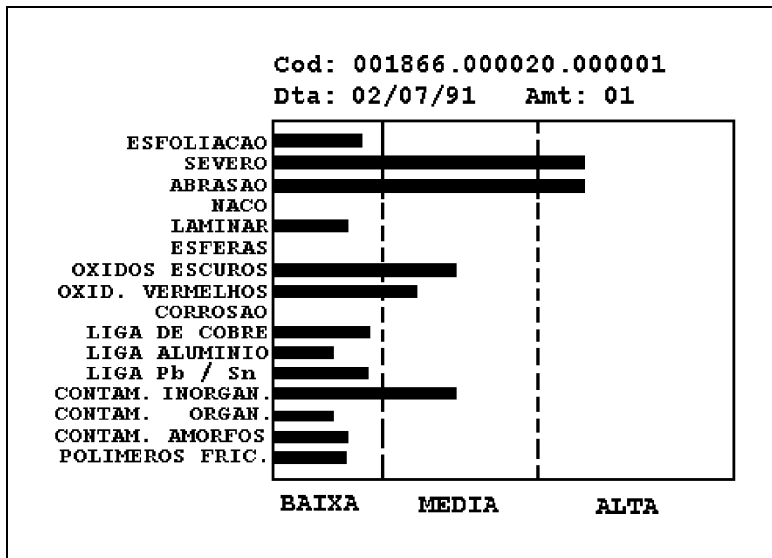


O pico observado no gráfico acima indica a ocorrência da falha. Mesmo com a troca do lubrificante que ocorreu em seguida, percebe-se que o desgaste evoluiu de maneira firme e crescente.

Indicação de defeito

Compressor frigorífico. Tendo sido cumpridas aproximadamente a metade das horas entre intervenções programadas, a presença de partículas de desgaste, Severo e Abrasão em aço, em metal patente e em bronze, indicaram a necessidade de intervenção.

Os dois ferrogramas subsequentes mostram as condições antes e após a intervenção.



Seqüência de ferrogramas efetuados antes e após a parada para manutenção.

Limitação de ensaios convencionais em óleos lubrificantes

Regulador de velocidade de turbina hidráulica para geração de energia elétrica (concessionária).

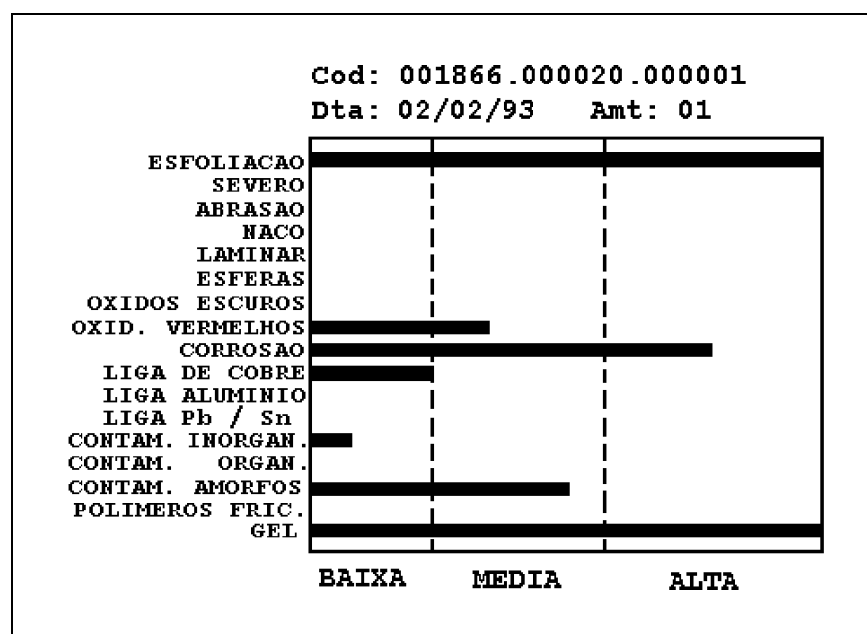
Apesar dos ensaios físico-químicos (viscosidade, acidez, espectrometria por infravermelho e por absorção atômica, insolúveis, contagem de partículas, indução à oxidação etc) terem aprovado a carga de óleo em uso, a unidade sofria interrupções por travamento do conjunto eletro-hidráulico de regulação.

Os exames ferrográficos apontaram a presença de Gel. São partículas resultantes da oxidação do óleo, com forma polimérica e capazes de entupir as pequenas folgas do regulador.

Conclusão

A ferrografia é uma técnica poderosa e de grande valia na diagnose de condição de máquinas, trazendo os seguintes benefícios comprovados:

- Aumento da vida útil pela indicação de problemas ainda insipientes
- Redução dos custos de manutenção pela postergação científica de paradas programadas;
- Aumento da disponibilidade operacional;
- Desenvolvimento de melhores materiais, lubrificantes e métodos de manutenção.



Apesar de todos os ensaios físico-químicos apontarem o óleo como em condição de uso, a Ferrografia indicou que os problemas de travamento do atuador eletro-hidráulico da turbina eram devido especialmente ao Gel (oxidação do óleo).

A acidez foi dada também como normal. Entretanto, observa-se a presença de corrosão. Conclui-se que os parâmetros geralmente utilizados para a aprovação/condenação de lubrificantes devem ser reavaliados, levando-se em conta a máquina específica.

Alinhamentos

No estudo dos acoplamentos vimos que cada tipo tolera um certo grau de desalinhamento em cada direção, limite além do qual ocorre um desgaste excessivo e eventualmente a ruptura. Além disso, a experiência mostra que, máquinas desalinhadas apresentam desgaste de mancais, de selagens e vibrações excessivas, as quais por sua vez, realimentam o processo de deterioração das máquinas e podem precipitar a ruptura de peças vitais.

Alinhamento de dois equipamentos mecânicos é a tarefa de tornar coincidentes as linhas de centro de seus respectivos eixos.

Alinhamentos

O método de alinhamento é escolhido pela facilidade de ser aplicado frente às circunstâncias locais: números de máquinas, distância entre pontas de eixo, leituras com máquina em operação, geometria de carcaça, etc.

De modo geral, o procedimento de alinhamento consiste em fazer algumas leituras de posição das máquinas e calcular o quanto cada máquina deve ser deslocada para que assuma a posição correta. O alinhamento pode ser feito a quente ou a frio.

Alinhamento a frio

Ele é feito na temperatura ambiente. Em alguns casos, o fabricante fornece dados para que se deixe um pequeno desalinhamento residual de modo a compensar a dilatação térmica de um dos equipamentos, durante seu funcionamento, como é o caso de uma turbina.

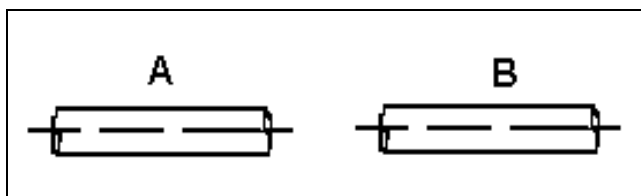
Alinhamento a quente

Este alinhamento, quando possível, é executado a temperatura normal de operação. Em equipamento de grande porte e de maior responsabilidade é feito primeiro um alinhamento é recheado e em alguns casos é acompanhado de medição de vibração.

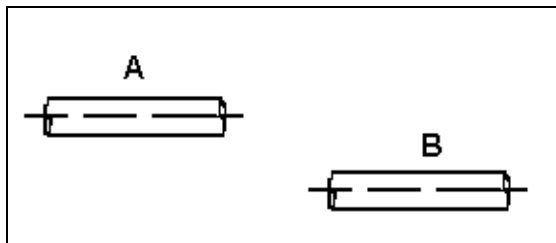
Princípios básicos

Tipos de desalinhamentos de eixos

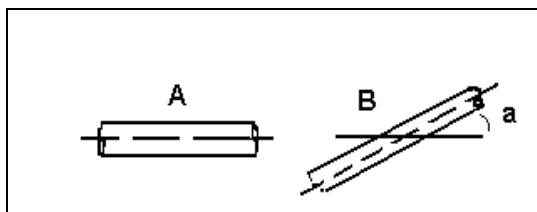
1. Eixos alinhados - Os eixos (A) e (B) pertencem a mesma linha de centro de referência.



2. Eixos com desalinhamentos paralelo - O eixo (B) desalinhado paralelamente, tem sua linha de centro deslocada paralelamente a linha de centro do eixo de referência (A).



3. Eixos com desalinhamento angular - O eixo (B) desalinhado angularmente tem sua linha de centro cruzando a linha de centro de seu eixo de referência (A) formando um ângulo "a" entre eles.



4. Eixos com desalinhamento paralelo angular - O eixo com desalinhamento de ambos os tipos tem sua linha de centro com deslocamento paralelo e angular em relação a linha de centro do eixo de referência. É o mais comum dos desalinhamentos. Neste caso recomendamos a seguinte seqüência de alinhamento:

- fazer o alinhamento angular no plano horizontal
- fazer o alinhamento paralelo no plano horizontal
- fazer o alinhamento angular no plano vertical
- fazer o alinhamento paralelo no plano vertical

O operador deve se colocar como se estivesse em cima do acionador, (motor elétrico) olhando para o equipamento acionado (bomba).

Alinhamento a laser

É um aparelho com o qual se faz leituras e correções de alinhamento com processo óptico que usa Raio Laser. As leituras são alimentadas diretamente para um computador que por sua vez dá os valores de calços e deslocamentos laterais necessários, bem como fornecer o valor das leituras nos cubos de acoplamento.

É essencialmente composto por um emissor e detector raio laser (raio de luz infravermelho, visível a olho nu), dois suportes de fixação para eixos, um inclinometro, uma trena em escala métrica e inglesa e uma calculadora de cristal líquido do próprio sistema.

Algumas características do sistema

- Distância de atuação, de até 5 metros
- Correção de deflexão desnecessária
- Pode ficar acoplado ou não
- Fácil descobrir o pé manco
- Valores de dilatação térmica facilmente introduzidos no computador.
- Os dados do desalinhamento são diretamente alimentados para o computador e este fornece os valores de calços e correção lateral necessários.
- As condições de desalinhamento radial/axial são também fornecidas pelo computador e sua correção pode ser monitorada.
- Alinhamento de equipamentos verticais (motor elétrico e bomba vertical) também é possível.
- sistema é leve, portátil e não necessita de fonte externa (usa bateria).

Sistemas a laser

Os sistemas a laser usam raios laser e detectores eletrônicos, tornando a medição precisa devido a inclinação do feixe a laser.

Existem dois tipos comuns de sistemas a laser, baseado em diferentes técnicas.

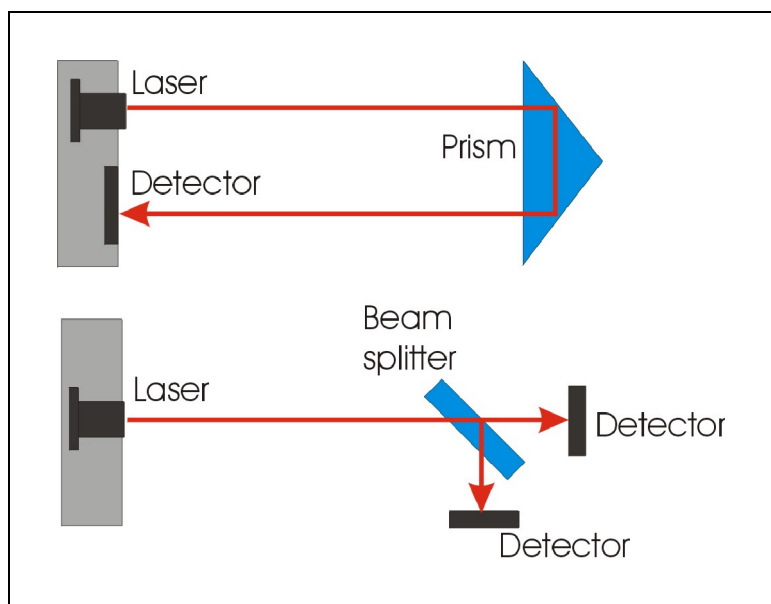
- laser simples, com uma mira simples.
- laser duplo, usando a técnica de relógio reverso.

Laser simples com mira simples ou dupla

Este tipo de sistema usa auto combinação para medir excentricidade e ângulo com um prisma refletor ou um alvo. O alvo pode medir ambos componentes vertical e horizontal juntos, com o ângulo simultaneamente. Enquanto este método é preciso em medições em ângulo sobre curtas distancias, é difícil usa-lo em alinhamento grosseiro.

No entanto, algumas compensações matemáticas estão disponíveis, quando movimentamos máquinas desacopladas. Uma nova medição é requerida depois de cada movimento pois se perde referência.

Esse sistema não é capaz de distinguir, por si mesmo, um movimento de um lado para outro, ou a rotação independente de cada eixo. Para compensar esta limitação você pode precisar acoplar os eixos de alguma forma, para deixar os eixos girar uniforme.

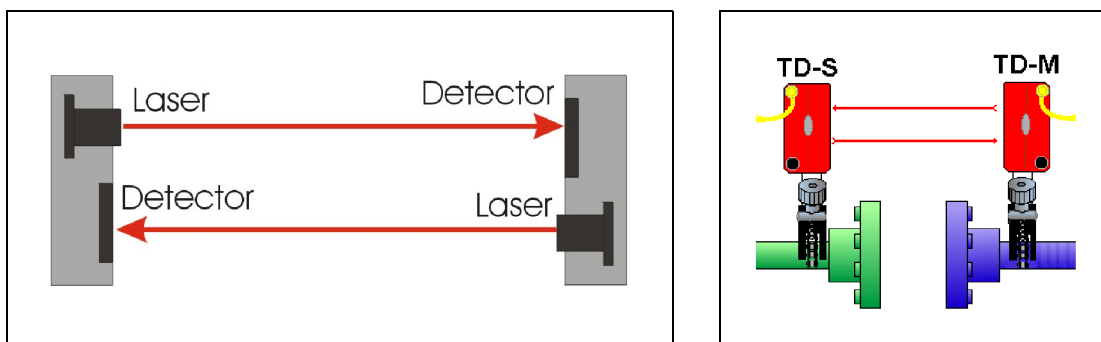


Laser duplo usando a técnica de relógio reverso

Este sistema apresenta os maiores benefícios do método reverso. Dois sistemas de medição são usados, com um laser e um detector em cada unidade. A técnica é usada mostrando na tela o momento do alinhamento e as correções são atualizadas quando a máquina está movimentando.

A mais recente geração de equipamento tem uma resolução de 0.001 com filtro para compensar o ruído do ar e vibração da máquina.

A flexibilidade do sistema, especialmente em alinhamentos grosseiros, quando alinhamos eixos cardam em grandes distâncias ou acionamentos das torres de resfriamentos.



Alinhamento grosseiro com sistema de laser duplo

Ao usar os sistemas de alinhamento com laser você usa o mesmo princípio usado no alinhamento de precisão. Para tornar isso mais claro, vamos descrever o conceito de projeção do eixo de rotação, chamado de “coning” em inglês.

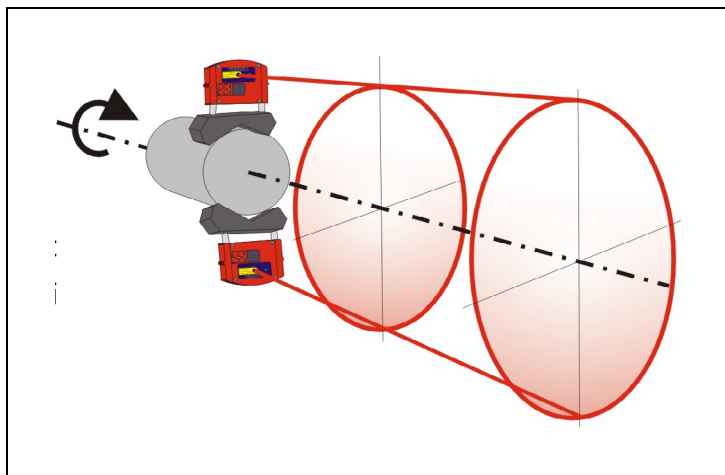
Coning

Como já foi mencionado na primeira seção, o alinhamento de eixos trata de tornar paralelos dois eixos rotativos. Diversos métodos são usados para alcançar isso, visando determinar o eixo de rotação de uma máquina e compará-lo com o da outra máquina. No emprego de sistemas de laser duplo, usa-se um método especial de projeção do eixo de rotação, chamado “*coning*”, ou formação de um cone.

O fato de que a luz de laser cria uma linha perfeitamente reta, sem vergamento, torna possível a projeção do eixo de rotação de qualquer objeto rotatório, mesmo vencendo longas distâncias. Fixando o laser num objeto giratório, o feixe de laser descreverá um cone.

Quando tal “cone” for projetado num plano, o feixe descreverá um círculo e o centro desse círculo será o centro de rotação naquele plano particular. A direção do eixo de rotação é determinada projetando o eixo de rotação sobre dois planos.

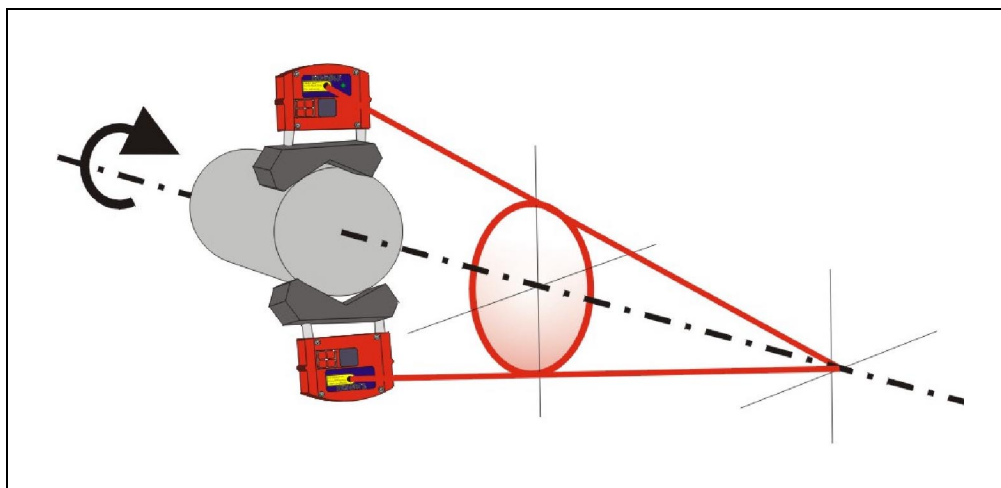
Esse é basicamente o princípio usado no método reverso descrito anteriormente, e está ilustrado abaixo na figura abaixo.



Coning 1

O eixo de rotação é o centro do círculo que o laser em rotação descreve. Este é o princípio básicos de alinhamento de dois eixos próximos um ao outro, como é o caso na maioria de alinhamentos de eixos.

Ao ajustar o ângulo do feixe de laser emitido sobre o transmissor, o diâmetro do círculo projetado diminui, até que o feixe finalmente descreve um ponto. Essa técnica de formação de conexão pode ser usada para criar “pontos” em diferentes distâncias do objeto em rotação para projetar o eixo de rotação.



Coning 2

O eixo de rotação torna-se um ponto numa distância da extremidade do eixo. Isso é útil quando os eixos estão afastados um do outro (alinhamento de eixos cardan).

Cuidados especiais de alinhamento

- afastamento entre os cubos dos acoplamentos devem estar dentro do indicado pelo fabricante, e levando em conta, quando aplicável, a posição do centro magnético do motor.
 - alinhamento deve ser feito de acordo com as instruções do fabricante.
 - Compensar as eventuais dilatações térmicas diferenciais entre acionador e acionado para as condições de operação.
 - Dispositivos roscados (macacos) devem ser instalados para facilitar o posicionamento do equipamento.
 - Os calços complementares de apoio necessários ao perfeito alinhamento devem ser colocados no acionador. Os calços devem ser de latão ou aço inoxidável.
 - A espessura total dos calços complementares, não devem exceder a 3mm em cada apoio, e deve ser obtida com um máximo de 5 calços, os quais não devem ter espessuras totais diferentes em pontos de apoio simétricos ao eixo de rotação.
 - As superfícies de apoio dos pés do equipamentos tem que estar perfeitamente paralelas.
-
- Na leitura axial atentar para o possível deslocamento axial do eixo.
 - Planeje cuidadosamente cada etapa do alinhamento.
 - Verifique as tubulações quanto: aos apoios, se estão corretamente instalados e se os flanges estão perfeitamente alinhados com os flanges da máquina.
 - Determine qual das máquinas será movimentada para corrigir o alinhamento.
 - Repita as leituras para ter certeza que estão consistentes.
 - Faça um movimento de cada vez na máquina. Só depois de concluir o alinhamento no plano vertical, comece a linhar no plano horizontal.

Caso algumas das máquinas trabalhe com temperatura alta, e não se disponha de informações quanto a compensações no alinhamento a frio, deve-se proceder a uma verificação do alinhamento na condição de operação.

Análise por sintomas

O controle da manutenção tem por objetivo obter informações para orientar tomadas de decisões quanto a equipamentos e a grupos de manutenção. Faz isso por meio da coleta e tabulação de dados, aperfeiçoando a interpretação dos resultados e criando padrões de trabalho.

A função primordial do controle é alimentar o planejamento, a programação, a supervisão, etc., com dados claros e confiáveis.

O controle exige a criação de padrões. E padrão significa procedimentos dinâmicos normalizados com critérios de qualidade e quantidade.

Tomada de decisões

A tomada de decisões na manutenção envolve geralmente vários departamentos, devido a necessidade de informações de várias fontes. Assim, mesmo que seja um pequeno reparo, é preciso haver um processo para a tomada de decisão.

Existe um problema decisório sempre que:

- Há um objetivo em vista;
- São possíveis pelo menos duas opções;
- Há dúvida quanto a melhor opção;
- Existem fatores externos fora do controle que podem afetar o resultado.

A rotina diária da manutenção é o constante tratar com a ocorrência de falhas e defeitos. E sempre se busca soluções para minimizar a frequência desses eventos, principalmente os repetitivos. Para tomar as medidas mais adequadas é necessário conhecer o comportamento das falhas.

Análise de sintomas

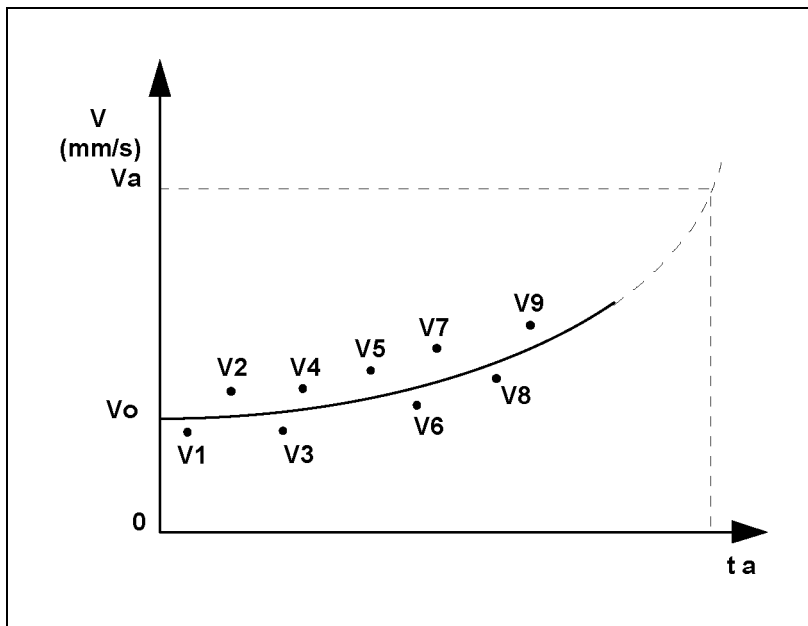
Consiste em coletar sinais nas partes externas da máquina, sem interromper o funcionamento, para obter informações sobre os processos de desgaste interno.

Para isso, empregam-se as seguintes técnicas:

- Medida de temperatura.
- Medida de folgas.
- Medida de pressão.
- Medida e análise de vibrações.
- Análise de desgaste através de amostra do lubrificante.
- Análise das características físico-químicas do lubrificante.
- Ensaio não-destrutivo.
- Nível de ruídos.

Os valores medidos recebem tratamento matemático a fim de mostrar o processo degenerativo da máquina e fazer a previsão da falha, ou seja, por meio dos valores medidos constroem-se curvas de degeneração que permitem planejar a intervenção no momento em que o componente já rendeu o máximo de sua vida útil e está prestes a falhar.

Na Figura abaixo vê-se uma curva ajustada e extrapolada do acompanhamento da velocidade de vibração de um mancal de rolamento.



V_0 = Velocidade inicial

V_a = velocidade de alarme

T_a = Tempo de alarme

P = Ponto preditivo

O ideal da manutenção preditiva é ter o monitoramento constante, isto é, os sinais são coletados por meio de sensores permanentes e processados continuamente por um computador.

Esse procedimento, porém, é muito caro e só é empregado em uma quantidade reduzida de máquinas, são aquelas cuja parada acarreta grande prejuízo financeiro ou grande comprometimento das segurança. O que se tem, em geral, é o uso de medidores de ruído, vibração ou temperatura portáteis que fazem medições periódicas constituindo um método mais preventivo do que preditivo.

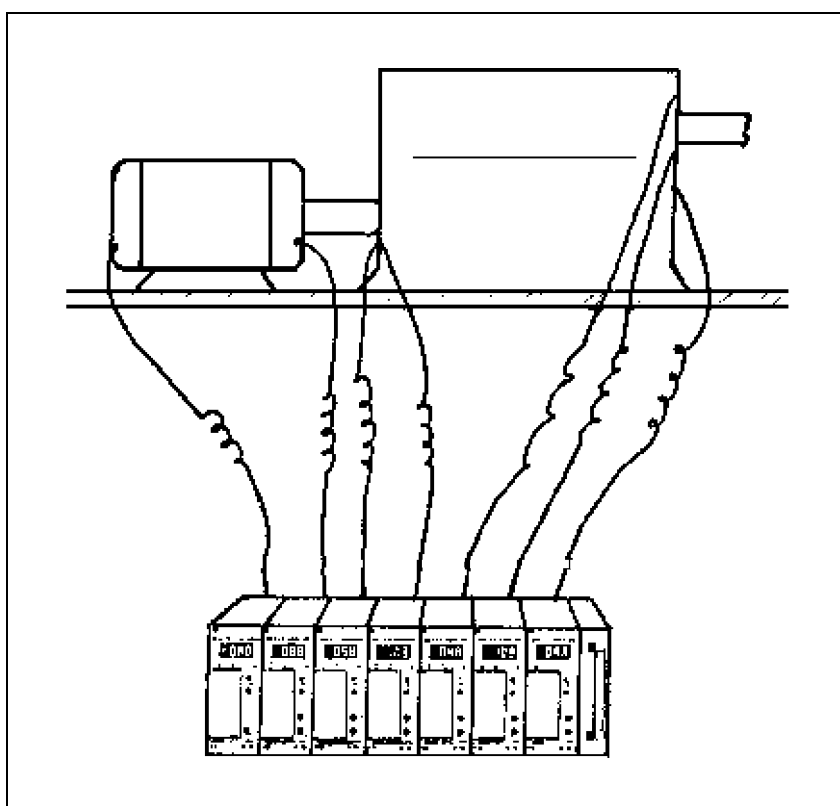
Devido a isso, muitos autores e especialistas brasileiros em manutenção não admitem a existência da manutenção preditiva no Brasil, considerando os procedimentos expostos como manutenção preventiva programada.

Exemplos de aplicação

Exemplo 1

Nas plantas de processo contínuo tem-se, para os equipamentos mais críticos, a preditiva com monitoramento contínuo.

Sensores de vibração, temperatura e folga são fixados permanentemente à máquina. Eles mandam sinais à um processador de dados que emite um sinal alarme para a manutenção. Além disso, em caso de falha grave o processador pode interromper automaticamente o funcionamento.

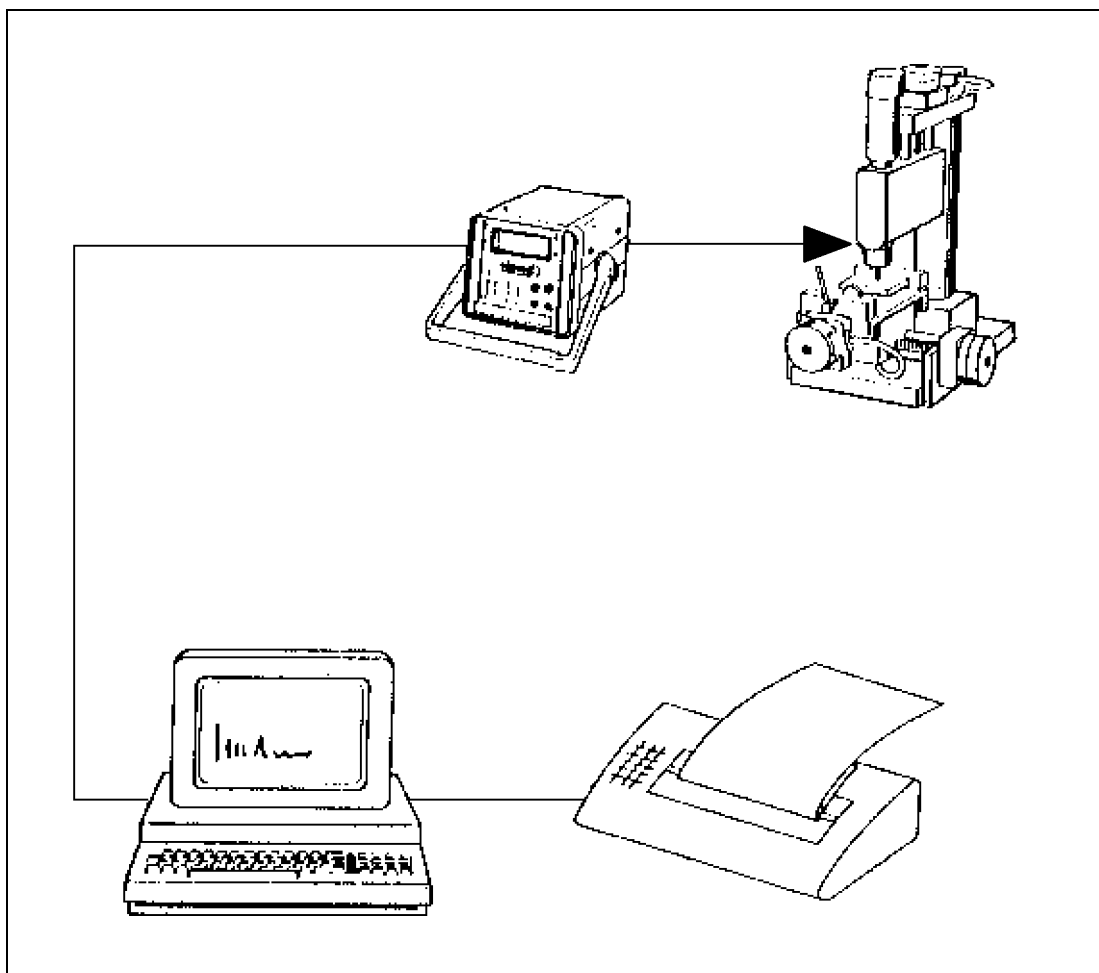


Exemplo 2

Nas metalúrgicas e outras manufatureiras (empresa de processo discreto) geralmente os componentes mais sensíveis das máquinas são os rolamentos. Por isso, foram desenvolvidos programas de monitoramento dos rolamentos. Sua execução consiste em:

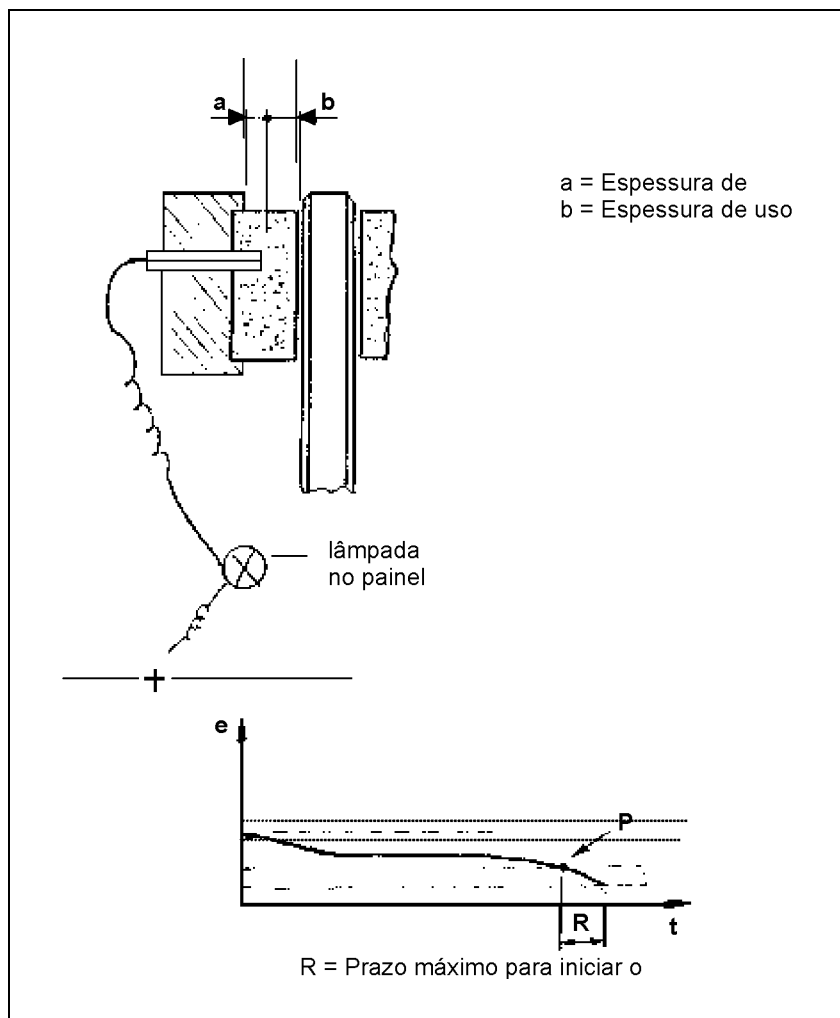
- Um mecânico toma periodicamente as medidas de vibração em pontos pré-estabelecidos.
- As medidas são armazenadas em um coletor de dados portátil.
- Os dados do coletor são transferidos para um computador equipado com software gerenciador.

- Os dados são tratados e geram, relatórios, quadros de acompanhamento e informações sobre a necessidade ou não de serviço.



Exemplo 3

Em sua forma mais simples, o ponto preditivo pode ser determinado apenas com uma lâmpada de alarme e um sensor. Este, deve permitir a passagem de corrente elétrica quando o elemento monitorado atingir o nível de alarme. É o caso da luz testemudo desgaste de uma pastilha de freio num automóvel.



Tribologia

A palavra tribologia tem sua origem na língua grega – “tribos” (atrito). Assim, é definida como a ciência que estuda as superfícies atuantes em movimentos relativos e todos os fenômenos daí decorrentes, principalmente o desgaste.

Os estudos da tribologia são direcionados aos efeitos do atrito, possibilitando assim uma maior disponibilidade operacional de máquinas e equipamentos. Atualmente existem no mundo muitos institutos dedicados ao desenvolvimento de materiais que ofereçam maior desempenho e durabilidade.

Vários dos materiais usados atualmente para se evitar o atrito foram desenvolvidos por esses institutos, tais como:

- Plásticos autolubrificantes;
- Revestimentos antiatrito;
- Aditivos especiais para lubrificantes;
- Materiais combinados.

Para se ter uma completa compreensão do fenômeno do desgaste, é preciso que sejam considerados dois aspectos; o atrito e a lubrificação. Sempre que duas superfícies se movimentarem, uma em relação à outra, ocorrerá o desgaste, causando danos em uma ou nas duas superfícies.

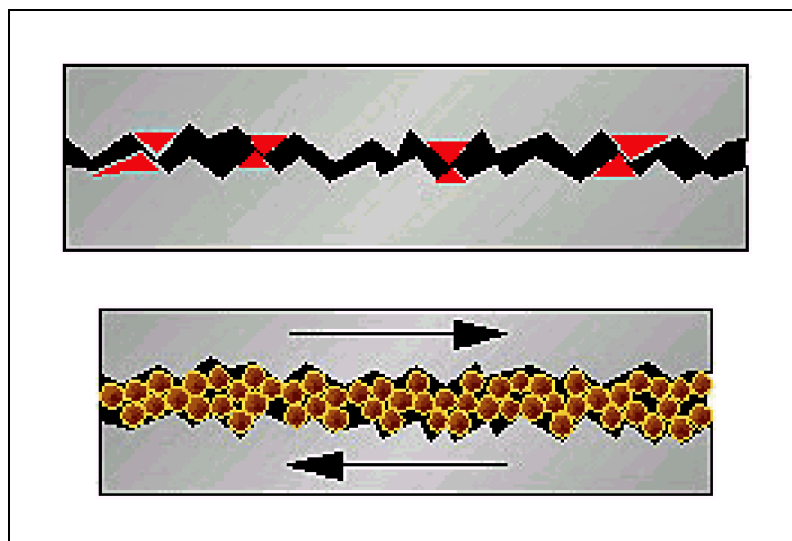
Além da lubrificação, outra variável que deve ser considerada diz respeito à escolha dos materiais. Quando se utiliza materiais dissimilares, a taxa de desgaste é menor em relação aos materiais similares.

Com relação aos materiais cerâmicos, estes alcançam dureza elevada, resultando em taxas menores de desgaste. Porém, esse material oferece também algumas desvantagens na sua aplicação, principalmente tenacidade à fratura e dificuldades de fabricação.

Atrito

Sempre que houver movimento relativo entre duas superfícies, haverá uma força contrária a esse movimento. Essa força chama-se atrito. Em algumas situações ele se torna útil e necessário como nos sistemas de freios, porém, em outros casos é indesejável porque dificulta o movimento, gera calor e consome energia motriz, sem produzir o correspondente trabalho.

A resistência ao movimento acontece em virtude das superfícies apresentarem asperezas e irregularidades que se chocam durante o movimento provocando o cisalhamento dos pontos (picos) mais altos em ambas as partes.



Quando as superfícies em contato apresentam microáreas planas, ocorre uma adesão entre essas microáreas que também é conhecida como solda a frio, sendo esta a maior responsável pela resistência ao movimento.

Desgaste

A melhor maneira de se reduzir o atrito e diminuir o desgaste é a lubrificação das superfícies. Sendo assim, o conhecimento das leis do desgaste ajuda-nos a saber como evita-lo e como fazer uma lubrificação correta; são elas:

- A quantidade de desgaste é diretamente proporcional a carga;
- A quantidade de desgaste é diretamente proporcional à distancia deslizante;
- A quantidade de desgaste é inversamente proporcional à dureza da superfície.

As superfícies em movimento relativo podem apresentar dois tipos de desgaste:

- Por deslizamento: provocado pela adesão que leva a uma contínua destruição da rugosidade e remoção de material do componente menos resistente;
- Por partículas duras: resultado de um processo abrasivo causado pela diferença de dureza ou rugosidade das superfícies em movimento. Essas partículas ficam presentes na forma de contaminantes e aceleram o desgaste.

Lubrificação

A lubrificação é o fenômeno da redução do atrito entre duas superfícies em movimento relativo. É obtida pela introdução de uma substância lubrificante entre as superfícies. Sendo assim, a película lubrificante pode ser espessa ou fina.

A película fina não tem espessura suficiente para manter a separação completa e constante das superfícies e serve apenas para reduzir a severidade do atrito.

A película espessa é suficiente para manter a separação total das superfícies durante o trabalho. Ela é maior que a rugosidade superficial do material.

Portanto, a finalidade das técnicas de lubrificação é conseguir uma película espessa, embora nem sempre isso seja possível.

Lubrificação hidrodinâmica

É aquela em que o fluido se desenvolve entre as superfícies, em virtude do movimento relativo entre as próprias superfícies.

Sob essas condições de lubrificação, teoricamente, não há desgaste uma vez que as superfícies nunca entram em contato.

Entretanto, na prática, a lubrificação hidrodinâmica garante um coeficiente de atrito entre 0,001 a 0,03, dependendo da viscosidade do óleo, da forma e estado das superfícies, da velocidade relativa e da carga aplicada sobre a película.

Lubrificação elastohidrodinâmica (limítrofe)

Se o contato entre as superfícies envolver nominalmente uma linha ou ponto de contato, então a carga na zona de contato será geralmente muito maior do que aquela encontrada para condições de lubrificação hidrodinâmica. Isso ocorre onde o

mecanismo lubrificado dificulta a formação da película lubrificante por efeito hidrodinâmica. É o caso de bielas, rolamentos e sistemas que atuam com atrito de rolamento.

Nesse processo, a pressão exercida pelo trabalho obriga o óleo a afastar-se da área de carga. Porém, a viscosidade impede que o óleo escape totalmente de imediato. Disso resulta uma película capaz de suportar a carga por algum tempo. Esse tempo é suficiente para que a carga mude seu ponto de aplicação e ocorram outros esmagamentos em seqüência.

Neste processo de lubrificação, em virtude do aumento da tensão de contato, a viscosidade do óleo é maior, prejudicando a fluidez do filme durante o trabalho.

Lubrificação hidrostática

É o tipo de lubrificação que forma a película espessa por meio da pressão do fluido, estando as superfícies imóveis.

Nos equipamentos pesados e de baixa velocidade, o atrito de partida e de parada é muito elevado. Esse fato pode encurtar a vida útil dos mancais e até mesmo causar sua indisponibilidade.

Para minimizar esse problema, é bombeado fluido aos mancais por uma bomba auxiliar. Essa bomba pode ter acionamento manual ou automático e sua atuação faz com que o eixo se eleve sobre o mancal.

Geralmente, após a máquina atingir a velocidade de serviço, o bombeamento é desligado, visto que com a rotação, a película se mantém pelo efeito hidrodinâmica.

Em alguns grandes cilindros de laminação e turbinas de hidrelétricas, a lubrificação hidrostática é a única existente. Isso porque a velocidade de serviço não permite um bom efeito hidrodinâmica.

Atualmente esse sistema de lubrificação é empregado em guias e mancais de retificadoras, pelo efeito da precisão oferecida pelo sistema, além do baixo atrito que não permite variações no nível da mesa.

Especificação de lubrificantes

A especificação do lubrificante descreve as características básicas e métodos de ensaios que foram submetidos os produtos pelo fabricante da máquina ou equipamento.

A forma mais utilizada para determinar estas características e métodos de ensaio são as normas que classificam os lubrificantes, como por exemplo: DIN, *ASTM, ISO VG (*) ASTM (American Society for Testing Materials), etc. Estas normas facilitam na escolha do lubrificante a ser usado e na comparação entre os diversos fornecedores.

Classificação AGMA para lubrificantes de engrenagens abertas

(AGMA: *American Gear Manufacturers Association*)

A faixa de viscosidade que identifica o número AGMA está na ASTM D 2422. O sufixo R identifica os lubrificantes com diluente volátil não inflamável. As faixas de viscosidades correspondentes, são referentes aos produtos sem o solvente.

Sem Extrema Pressão (com inibidor de ferrugem e oxidação)	Viscosidade		Com Extrema Pressão
	SUS a 100°F	SUS a 210°F	
4	626/765	-	4EP
5	918/1122	-	5EP
6	1335/1632	-	6EP
7	1919/2346	-	7EP
8	2837/3467	-	8EP
9	6260/7650	-	9EP
10	13.350/16.320	-	10EP
11	19190/23460	-	11EP
12	28370/34671	-	12EP
13	-	8.50/1.000	13EP
14R	-	2.000/4000	-
15R	-	4.000/8.000	-

Classificação AGMA para lubrificantes de engrenagens fechadas

A faixa de viscosidade que identifica o número AGMA está na ASTM D 2422. Todos os óleos EP (com aditivação de Extrema Pressão) devem possuir um IV mínimo de 60 e suportar 30 lbf no ensaio TINKEN. Os óleos sem EP, de 1 a 6, devem possuir um IV mínimo de 30 (se a temperatura de trabalho for maior que 44°C, o IV mínimo passa

para 60). Os 7, 8 e 8A Compounds de 3 a 10% de gordura natural ou sintética e devem possuir IV mínimo de 90.

Sem Extrema Pressão (com inibidor de ferrugem e oxidação)	Viscosidade		Com Extrema Pressão
	SUS a 100°F	SUS a 210°F	
1	193/235	41,4/50,6	-
2	284/347	61,2/74,8	2EP
3	417/510	90/110	3EP
4	626/765	135/165	4EP
5	918/1122	198/242	5EP
6	1335/1632	288/352	6EP
7 compound	1919/2346	414/506	7EP
8 compound	2837/3467	612/748	8EP
8A compound	4.171/5.098	900/1100	-

Classificação ISO para lubrificantes industriais

(*Internacional Standardisation Organization*)

O sistema ISO está baseado na viscosidade cinemática (*centistokes*) a 40°C. Os números que indicam cada grau ISO representam o ponto médio de uma faixa de viscosidade compreendida entre 10% abaixo e 10% acima dos valores nominais.

ISO Standart 3448 ASTM D-2422	Ponto médio de viscosidade	Viscosidade cinemática		Equivalência aproximada – SUS
		Mínimo	Máximo	
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42	32
ISO VG 3	3,3	2,88	3,52	36
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06	40
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48	50
ISO VG 10	10	9,00	11,0	60
ISO VG 15	15	13,5	16,5	75
ISO VG 22	22	19,8	24,2	105
ISO VG 32	32	28,8	35,2	150
ISO VG 46	46	41,4	50,6	215
ISO VG 68	68	61,2	74,8	315
ISO VG 100	100	90,0	110	465
ISO VG 150	150	135	165	700
ISO VG 220	220	198	242	1.000
ISO VG 320	320	288	352	1.500
ISO VG 460	460	414	506	2.150
ISO VG 680	680	612	748	3.150
ISO VG 1000	1.000	900	1.100	4650
ISO VG 1500	1.500	1.350	1.650	7.000

Classificação NLGI para graxas lubrificantes

A graduação de consistência é definida por limites, em décimos de milímetros, para penetração de um cone em uma amostra de graxa trabalhada (60 cursos no aparelho “*Grease Worker*”), conforme o ensaio ASTM D217-86.

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

Itens de estocagem

Lubrificar corretamente significa planejar e programar a lubrificação. Para que o sistema de lubrificação seja eficiente, algumas informações são essenciais:

- Tipos de lubrificante;
- Quantidade utilizada;
- Quando utilizar;
- Onde utilizar.

Coordenar e controlar essas informações significa planejar a lubrificação. As fases para implementação desse planejamento são as seguintes:

- Levantamento dos equipamentos;
- Racionalização dos estoques;
- Programação;
- Codificação e identificação do lubrificante;
- Controle das atividades

Levantamento dos equipamentos

Nessa fase executa-se uma espécie de inventário dos equipamentos de cada setor da empresa. Isso é feito elaborando-se fichas individuais para cada equipamento. Devem constar as seguintes informações:

- Nome do equipamento;
- Número de identificação;
- Localização (TAG);
- Pontos a lubrificar;
- Capacidade dos reservatórios;
- Métodos de aplicação;
- Frequência de aplicação;
- Serviços (troca de filtros, limpeza, etc.);
- Lubrificantes recomendados;
- Foto do equipamento.

Com essas informações é possível elaborar o plano de lubrificação da máquina.

Racionalização dos estoques

Após o levantamento dos equipamentos, faz-se um estudo sobre as especificações dos lubrificantes recomendados.

A finalidade desse estudo é detectar semelhanças e equivalência entre os produtos. Com isso é possível reduzir a variedade de itens no estoque.

Usando o menor número possível de lubrificante, evita-se erros de aplicação, reduz os custos e simplifica o armazenamento e controle dos produtos.

É importante também que se tenha uma tabela de equivalência entre os vários fornecedores que auxilia no reabastecimento de estoques.

Quanto à estocagem, é recomendável obedecer algumas regras tais como:

- Manter limpo o local de armazenagem e distribuição;
- Identificar de forma clara as informações do lubrificante;
- Manter os produtos em local adequado e sem contaminantes;
- Os tambores estocados na área externa devem ser protegidos de água da chuva e poeira;
- Permitir o acesso ao local, somente de pessoas preparadas para a atividade;
- Utilizar a regra “fifó” para utilização dos produtos;
- Garantir a segurança das instalações.

Sistemática de lubrificação

Estabelecer uma sistemática de lubrificação, compreende na implantação de um plano constituído de programação, codificação e controle das atividades desenvolvidas.

Programação

Um bom programa de lubrificação deve atender todas as necessidades dos equipamentos.

Elaborar um roteiro de lubrificação auxilia na execução dos trabalhos e deve ser baseado no leiaute das máquinas, sua disponibilidade, frequência de aplicação e tempo de deslocamento. O roteiro deve ser o mais racional possível a fim de obter a máxima produtividade.

A programação deve estabelecer um calendário de serviços, com atividades diárias e abrangência anual.

Codificação e identificação

Para facilitar a identificação é necessário criar uma codificação de fácil interpretação para os usuários. Esses códigos devem ser marcados nos equipamentos (próximo aos pontos de aplicação), nos dispositivos de aplicação e nos depósitos.

As codificações usuais são combinações de cores, figuras geométricas e números. Através de plaquetas, adesivos ou gravações, são informados o óleo a ser utilizado, o período de aplicação e a quantidade aplicada.

A norma DIN 51502 estabelece os códigos quanto ao lubrificante, deixando à livre escolha o código para a ocasião de aplicar (frequência)

Os símbolos recomendados pela DIN são:



- Quadrado: indica o óleo;
- Triângulo: indica a graxa;
- Losango: indica lubrificação permanente;
- Letras: indica finalidade;
- Números: indica viscosidade ou consistência.

Quanto ao código de frequência de aplicação do lubrificante, os símbolos da norma DIN tornam simples a introdução de um código de cores da seguinte forma:

- Amarelo: aplicação diária;
- Azul: aplicação semanal;
- Vermelho: aplicação mensal;
- Preto: aplicação conforme especificação.

Codificação DIN

Tipo de lubrificante	Código DIN	Viscosidade ISO
Óleo hidráulico (HL, HLP, HLP(D))	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> HLP 46 </div>	VG 46
Óleo aplicado sob pressão (lubrificação centralizada)	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> CGLP 220 </div>	VG 220
Óleo para engrenagens de variadores de velocidade	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> CL 32 </div>	VG 32
Óleo para fusos e rolamentos (c)	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> CL 10 </div>	VG 10
Óleo para engrenagens normais	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> CLP 220 </div>	VG 220
Óleo para mancais de alta velocidade	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> CL 5 </div>	VG 5
Óleo de corte	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> SL 32 </div>	VG 32
Óleo emulsionável	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> SEL 46 </div>	VG 46


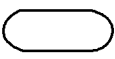



Tipo de lubrificante	Código DIN	Consistência
Graxa para mancais		NLGI 2
Graxa para lubrificação permanente		NLGI 2

Codificação convencional

É uma codificação com boa aceitação entre as empresas. Consiste no uso de figuras geométricas para indicar a freqüência de aplicação do lubrificante, e no uso de cores para indicar a finalidade ou o tipo de lubrificante.

Quadro: Codificação convencional

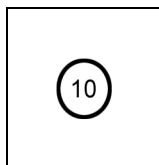
Cor		Tipo ou finalidade
Amarelo		Graxas
Verde		Turbina, compressor de ar e sistema hidráulico
Vermelho		Cilindro a vapor
Azul		Lubrificação geral
Marrom		Fuso
Lilás		Máquina têxtil
Preto		Usinagem
Laranja		Caixa de engrenagem EP
Branco		Refrigeração
Cinza		Tratamento térmico
Prata		Transformador
Ouro		Transferência de calor

Freqüência		
		
diária	Semanal	mensal
		
semestral	anual	

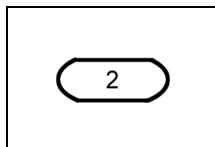
A codificação convencional pode ser melhorada com a inclusão de símbolos numéricos para indicar o produto a ser usado.

Os números podem ser usados também para indicar frequências que não constam entre as figuras.

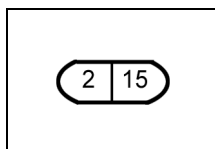
Lubrificação diária com o produto código 10



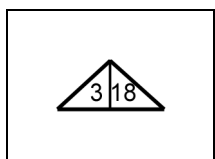
Lubrificação cada duas semanas



Lubrificação cada duas semanas com o produto código 15



Lubrificação trimestral com o produto código 18



Controle

Controlar é uma atividade indispensável para que a lubrificação planejada dê bons resultados.

O ideal é fazer o controle com auxílio do computador, porém sistemas manuais oferecem resultados satisfatórios.

O controle deve atuar sobre os seguintes pontos:

- Serviços;
- Consumo;
- Estoque.

Controle dos serviços

É necessário que o responsável pelo setor de lubrificação saiba, com segurança, quais os serviços executados e quais os transferidos.

Esse controle é feito por meio de análise diária da “rotina individual do lubrificador” .

A análise deve ser feita no início do período de trabalho, para detectar os eventuais serviços não cumpridos no dia anterior. Com isso, é possível reprogramar e evitar falhas na lubrificação.

Para ter um controle eficiente, é necessário sensibilizar o lubrificador quanto ao preenchimento correto da sua ficha.

Controle do consumo

Esse controle visa à previsão de estoques e detectar prováveis desperdícios.

O controle de consumo é feito por meio de duas fichas:

- Ficha de consumo diário;
- Ficha de consumo anual.

Devido à grande dificuldade em controlar o consumo por máquina, ambas as fichas fazem o controle por seção de trabalho.

Análise de óleos

A análise de óleo tornou-se uma das ferramentas mais eficazes para se atingir o máximo desempenho dos processos produtivos pois, através dela, pode-se conseguir maior disponibilidade, confiabilidade e durabilidade dos equipamentos, assim como a redução de custos.

Dessa forma, tornou-se possível avaliar continuamente os parâmetros fora do normal que possam vir causar danos nos equipamentos como por exemplo nível de desgaste.

Através desse acompanhamento é possível aumentar a vida útil de equipamentos assim como reduzir o índice de falhas. Outro fator favorável é a possibilidade de acompanhamento da deterioração do próprio óleo lubrificante, evitando assim uma troca precoce.



Aparelho para ensaios

Problemas que podem ser detectados através da análise do óleo:

- Desempenho do lubrificante;
- Falha de componentes;
- Falha na refrigeração;
- Aplicação inadequada;
- Contaminação.

Os ensaios podem avaliar os contaminantes de forma qualitativa e quantitativa, assim como determinar o nível de deterioração do óleo.

Análises físico-química

São ensaios de rotina, normalmente solicitados ao laboratório ou realizados com instrumentos portáteis, variando de acordo com o tipo de serviço a que o produto se destina. Há ainda testes adicionais que são realizados para confirmação de suspeitas quanto ao estado do produto, para elucidar algum ponto que permaneça obscuro ou para confirmar resultados anômalos de testes de rotina.

(falta figura (maleta para ensaios))

Tabela de testes

Ensaio para óleos de engrenagens, transmissões, hidráulicos, pneumáticos, compressores de ar e refrigeração, máquinas operatrizes, turbinas e máquinas a vapor.

Ensaio	Tipo de equipamento					
	Engrenagens	Transmissões	Hidráulicos/ Pneumáticos/ Compressores de ar	Compressor de refrigeração	Máquinas operatrizes	Turbinas e máquinas a vapor
Cor ou aparência	R	R	R	R	R	R
Odor	R	R	R	R	R	R
Viscosidade a 40°C	R	A	R	R	R	R
Água	R	R	R	R	R	R
Ponto de fulgor	A	A	-	A	A	A
Acidez (NN)	A	-	R	R	R	R
Resíduo de carbono	-	-	-	-	A	-
Elementos de desgaste	A	A	A	-	-	-

Legenda: R= Rotina A= Adicional

Ensaio utilizados, descrição e interpretação

Como os resultados de análise de óleos novos não oferecem dificuldades quanto à sua interpretação, visto que basta comparar os resultados obtidos com os dados constantes na literatura do fabricante, as observações limitam-se aqui quanto aos resultados de análise dos óleos usados. Estes resultados devem ser sempre interpretados em conjunto, não se detendo em um único valor isolado, uma vez que o conjunto de resultados é que fornecerá subsídios para a resolução de problemas que estejam ocorrendo com o equipamento.

Os ensaios descritos a seguir são utilizados normalmente na análise de amostras de lubrificantes usados. Serão descritos sucintamente a execução e o significado dos ensaios.

Cor ou aparência

A cor de um óleo lubrificante sem uso não esta relacionada à sua qualidade ou ao seu desempenho.

A inspeção na cor de óleos usados dispensa o uso de instrumentos. Normalmente é feita visualmente e pode indicar a presença de contaminantes aos quais o produto está normalmente exposto.

O escurecimento do óleo pode ser devido à contaminação por óleo mais escuro ou à presença de contaminantes de oxidação ou combustão.

O clareamento pode indicar contaminação por óleo mais claro ou à presença de água (em forma de emulsão no óleo).

A presença de água na amostra é facilmente observável pois produz uma emulsão turva, opaca ou castanho-amarelada, dependendo da intensidade da contaminação ou do tipo de aditivação do óleo.

Viscosidade

Atualmente, a método mais utilizado para determinação da viscosidade é o ABNT 293 (ASTM D-44), que se refere à viscosidade cinemática e consiste na medição do tempo que um fluido leva para escoar por um capilar, sob uma determinada temperatura, entre duas marcas existentes em um tubo aferido (fatorado). A viscosidade cinemática é a resultante do produto entre esse tempo, em segundos, e o fator do tubo.

Uma maneira fácil e rápida de verificar a viscosidade é utilizando um viscosímetro portátil.

(Falta figura (viscosímetro portátil))

A viscosidade é uma das características mais importantes no controle do uso dos lubrificantes e deve ser mantida dentro de limites estabelecidos para o serviço do óleo em consideração.

De maneira genérica, um óleo não deve permanecer em serviço se o valor da viscosidade variar entre 20 e 25% da viscosidade original.

O aumento da viscosidade geralmente indica:

- Reposição feita com óleo de maior viscosidade;
- Presença de contaminantes no óleo (insolúveis);
- Oxidação do óleo;
- Perda por evaporação das frações leves do óleo lubrificante;
- Presença de emulsão decorrente da contaminação por água;
- Sistema de filtragem ineficiente;
- Quantidade insuficiente de óleo em circulação;

A diminuição da viscosidade geralmente indica:

- Reposição feita com óleo de menor viscosidade;
- Contaminação por combustível;
- Cisalhamento de aditivos melhoradores de IV;

Água

A contaminação por água é indesejável na maioria dos sistemas de lubrificação, pois pode resultar em:

- Formação de emulsões;
- Falha ou ineficiência de lubrificação em pontos críticos;
- Precipitação de aditivos por hidrólise;
- Formação de borras;
- Corrosão de superfícies metálicas.

A presença de quantidades maiores de água em óleos lubrificantes usados indica irregularidades mecânicas no equipamento ou desempenho insatisfatório do sistema de purificação.

Outra maneira de verificar a presença de água no óleo consiste em pegar uma amostra de 5ml de óleo e colocar numa chapa aquecida a 100°C. se o óleo frigar é porque possui uma determinada quantidade de água. Nesse caso é necessário fazer a destilação para identificar a porcentagem de água.

Acidez (número de neutralização - TAN)

Esse ensaio indica as quantidades totais de substâncias de caráter ácido ou alcalino, orgânica e/ou inorgânica, existentes nos óleos minerais. A acidez é titulada com KOH e o resultado expresso em miligramas de hidróxido de potássio por grama de amostra (mgKOH/g) necessários para a neutralização da acidez.

Nos óleos minerais puros, novos, a acidez não deve ultrapassar 0.05mgKOH/g. Na prática, a maioria dos óleos lubrificantes consiste de misturas de óleos minerais com aditivos que modificam sua acidez ou a alcalinidade.

Quando em serviço, os óleos têm maior ou menor tendência à oxidação. A velocidade dessa reação é fortemente acelerada por elevadas temperaturas ou pela presença de catalizadores tais como, ferro e cobre. Dependendo da natureza do óleo e dos aditivos que contém, pode haver formação de borras, lacas, vernizes, ácidos orgânicos e outros compostos que são prejudiciais ao desempenho da lubrificação.

Filtragem de partículas

Os sistemas de lubrificação de turbinas, hidráulicos, de engrenagens e sistemas circulatórios são contaminados por partículas metálicas e não metálicas resultantes de desgaste e contaminação externa, possivelmente causada por manutenção e serviços negligentes. Essas partículas provocam aumento de desgaste por abrasão, arranhamento e erosão das superfícies em movimento como também danos nos elementos de vedação.

O ensaio consiste em fazer passar um volume conhecido de uma amostra representativa de óleo através de um filtro de porosidade conhecida (1 μ), onde as partículas maiores ficarão retidas na superfície do filtro.

Utilizando um microscópio, é possível fazer a contagem das partículas, identificar o tipo e tamanho das partículas.

Dessa forma é possível estimar o nível de contaminação e a eficiência do sistema de filtragem.

Análise morfológica de partículas e de desgaste

Nesse ensaio, analisa-se as partículas desprendidas pelo processo de desgaste, corrosão, abrasão, fraturas e outros, e que ficam em suspensão no óleo lubrificante. Nessa análise podemos identificar o número, tamanho e forma das partículas que podem determinar a origem do problema, suas causas e assim facilitar um direcionamento das ações da manutenção.

Contagem de partículas

Esse ensaio é amplamente utilizado em sistemas hidráulicos que utilizam grandes volumes de óleo. A presença de contaminantes compromete o rendimento do equipamento, gera paradas e aumento de custos da manutenção.

O processo de contaminação é provocado pelo próprio sistema hidráulico; deterioração das tubulações, coroas de reservatórios, desgaste de bombas e componentes e outros.

Existem também fatores externos que contribuem para contaminar o sistema tais como: condições inadequadas de armazenagem do óleo, falhas no manuseio de recipientes e no próprio reabastecimento e falta de cuidados na realização de manutenções nos circuitos.

Atualmente existem aparelhos com condições de contar e classificar os contaminantes sólidos de qualquer granulometria. Isso possibilita o controle do óleo para que se tenha melhor rendimento do equipamento, aumento da vida útil do fluido e redução de falhas.

Os parâmetros de contaminação mais utilizados são: classe NAS e ISO 4406.

Classe N.A.S

NAS 1638 Standard

Faixa de Tamanho	(Limites máximo de contaminação, partículas por 100ml)													
	00	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5-15	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000	32.000	64.000	128.000	256.000	512.000	1.024.000
15-25	22	44	89	178	356	712	1425	2850	5.700	11.400	22.800	45.600	91.000	182.400
25-50	4	8	16	32	63	126	253	506	1.012	2.025	4.050	8.100	16.200	32.400
50-100	1	2	3	6	11	22	45	90	180	360	720	1.440	2.880	5.760
>100	0	0	1	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1.024
Utilização	A			B		C		D		E		F		

- A. Sistemas hipercríticos, satélites, naves espaciais, sistemas de mísseis.
- B. Sistemas críticos, controles com micro-servóvulas e grau do fluido quando novo.
- C. Sistemas servo controladas, proporcionais, controles de sistemas aéreos, sistemas de navegação.
- D. Escavadeiras Demag, sistemas hidráulicos industriais de alta pressão, transmissões hidrostáticas.
- E. Sistemas Móbil, equipamentos de movimentação de terra, guinchos, movimentação de materiais, uso geral de baixa pressão.
- F. Sistemas manuais, macacos hidráulicos, sistemas de uso esporádico.

Tabela de contagem de partículas ISO 4406

Números de Partículas por ml		Números da Escala
>acima	Até ou Igual	
2.500.000		>28
1.300.000	2.500.000	28
640.000	1.300.000	27
320.000	640.000	26
160.000	320.000	25
80.000	160.000	24
40.000	80.000	23
20.000	40.000	22
10.000	20.000	21
5.000	10.000	20
2.500	5.000	19
1.300	2.500	18
640	1.300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2.5	5	9
1.3	2.5	8
0.64	1.3	7
0.32	0.64	6
0.16	0.32	5
0.08	0.16	4
0.04	0.08	3
0.02	0.04	2
0.01	0.02	1
0.005	0.01	0
0.0025	0.005	00

A ISO 4406 (International Standards Organization) nível padrão de limpeza, tem obtido uma vasta aceitação em muitas indústrias de hoje. Uma versão modificada vastamente utilizada deste padrão refere-se ao número de partículas maiores que 2, 5 e 15 micra em um volume de 100 mililitros. O número de partículas maiores que 2 e 5 micra é usado como ponto de referência para partículas sedimentadas. As partículas maiores que 15 micra, contribuem grandemente para uma possível falha catastrófica no componente.

Custo-benefício

A implantação de uma sistemática de análise de óleos deve fornecer ao departamento de manutenção, condições para monitorar as condições do lubrificante quanto à presença de contaminantes bem como material particulado que compromete o pleno funcionamento dos equipamentos.

Os atuais processos de produção são dinâmicos e não permitem paradas para manutenção corretiva. As falhas não planejadas geram custos indesejáveis e causam prejuízos à produção. Dessa forma, os investimentos em métodos confiáveis de monitoramento dos equipamentos com lubrificação são menores que os custos gerados pelas falhas imprevistas.

A análise do óleo lubrificante deve trazer várias vantagens, tais como:

- Aumento na vida útil dos componentes;
- Maior disponibilidade de máquinas e equipamentos;
- Eficácia da manutenção;
- Economia de lubrificantes;
- Redução no índice de manutenção corretiva;
- Redução de custos;
- Confiabilidade dos equipamentos.

Prestação de serviços de manutenção pró-ativa

A manutenção pró-ativa é uma atividade resultante da aplicação das técnicas preditivas e da manutenção preventiva. O objetivo é identificar e eliminar causas potenciais de problemas antes que eles ocorram e, baseia-se nos relatórios gerados pelas técnicas preditivas que norteiam a tomada de ações da engenharia de manutenção.

Análise de contrato

As técnicas modernas de gestão priorizam os resultados que agregam valor ao produto e que são importantes aos clientes tais como: qualidade, confiabilidade, prazos, disponibilidade e menor custo.

Para tanto, a contratação de serviços de manutenção pró-ativa baseada em resultados deve ser considerada uma alternativa estratégica para atingir os resultados.

O contrato deve garantir uma relação de parceria e cooperação onde as duas partes tem por objetivo único, oferecer a maior disponibilidade do processo produtivo, como também estabelecer a disponibilidade mínima possível durante a vigência do contrato. Neste tipo de contrato é importante estabelecer metas e indicadores que possam quantificar a disponibilidade do processo produtivo e relacionar a remuneração dos serviços nos resultados alcançados.

Para que a contratação resulte em resultados favoráveis, é necessária uma análise crítica do grau de confiabilidade, qualidade e da capacidade técnica da empresa contratada.

Análise de relatório

O desenvolvimento dos trabalhos deve ser norteado pela análise dos relatórios das atividades de preditiva, segregando os problemas potenciais encontrados em tipos de falhas, tipo de equipamento, fabricante e outros fatores que possam contribuir para a eliminação do problema. Diante disso, as equipes responsáveis pelas duas organizações determinam a viabilidade de aplicação das ações, considerando principalmente a relação custo x benefício.

Desenvolvimento de fornecedores

A organização deve desenvolver uma lista de fornecedores de serviços qualificados, com informações de cadastro e experiência comprovada na área.

Para qualificar esses fornecedores, utilizam-se critérios tais como:

- **Confiabilidade:** a empresa deve comprovar sua capacidade de gerenciamento para trabalhar num sistema de parceria com objetivos comuns;
- **Capacidade técnica:** estar atualizada tecnologicamente e possuir recursos e pessoal qualificado para desenvolver os trabalhos;
- **Qualidade:** oferecer um trabalho de garantia da disponibilidade com qualidade e custos adequados.

Avaliação do desempenho

Durante a vigência do contrato, é importante que se tenha indicadores confiáveis de avaliação que visualizem a evolução dos resultados, como também o desempenho da equipe.

Os indicadores deverão ser quantitativos para possibilitar comparações ao longo do tempo, principalmente aqueles referenciados no contrato. Esses indicadores servem para avaliar as atividades e indicar tendências que servem para antever desvios que possam ser corrigidos antecipadamente.

Os indicadores é uma particularidade de cada organização, porém, é importante defini-los de forma estratégica para que possam traduzir em informações importantes tais como:

- Indicadores financeiros: custo de mão de obra, custo de materiais, custo de estoques, etc.
- Indicadores de produtividade: disponibilidade, prazo, etc
- Indicadores de qualidade: atrasos, retrabalhos, refugos, etc...
- Indicadores de manutenção: tempo de execução, taxa de falhas, etc

Abordagem estatística da falha

As atividades de manutenção envolvem, via de regra, variáveis probabilísticas. Assim, para compreender o comportamento das ocorrências é preciso conhecer os princípios básicos da estatística de falhas. Os principais parâmetros são:

- Média;
- Variância;
- Desvio padrão;

Média

É o valor típico das falhas, é por meio dela que se caracteriza o tempo até a falha de um componente. De outra forma, ela é considerada a **esperança matemática**, isto é, dá a idéia do tempo de bom funcionamento.

Variância

Como na prática, os componentes tendem a falhar em tempos em torno da média, isto é, há uma **dispersão** dos valores. Esta dispersão é medida pela variância e é calculada, no caso da manutenção, em horas ao quadrado.

Desvio padrão

Pelo fato de a variância ser uma unidade elevada ao quadrado, é inconveniente usá-la para análises. Assim, o valor que dá a idéia clara da **dispersão** é o desvio padrão, definido como a raiz quadrada da variância.

Exemplo

Uma linha de pintura de fogões é alimentada por uma transportadora em monovia, os troles que prendem os produtos são suportados por mancais de rolamento, ao todo existem 200 rolamentos do mesmo tipo. A tabela mostra os dados de funcionamento dos rolamentos.

Intervalo de classe TEMPO ATÉ A FALHA	Freqüência QUANTIDADE DE ROLAMENTOS	Freqüência relativa	Densidade de freqüência relativa FRAÇÃO POR HORA
800 – 900	2	0,01	0,0001
900 – 1.000	12	0,06	0,0006
1.000 – 1.100	36	0,18	0,0018
1.100 – 1.200	52	0,26	0,0026
1.200 – 1.300	48	0,24	0,0024
1.300 – 1.400	28	0,14	0,0014
1.400 – 1.500	14	0,07	0,0007
1.500 – 1.600	8	0,04	0,0004
	200	1	

Cálculos:

A média é dada por $m = \sum f_r t_r$; onde:

m – média (tempo até a falha)

f_r - freqüência relativa de um intervalo de classe

t_r - ponto médio de um intervalo de classe

$$m = (0,01 \times 850) + (0,06 \times 950) + (0,18 \times 1.050) + \dots + (0,04 \times 1.550) = \mathbf{1.206h}$$

A variância (s^2) é dada por $s^2 = \sum f_r (t_r - m)^2$

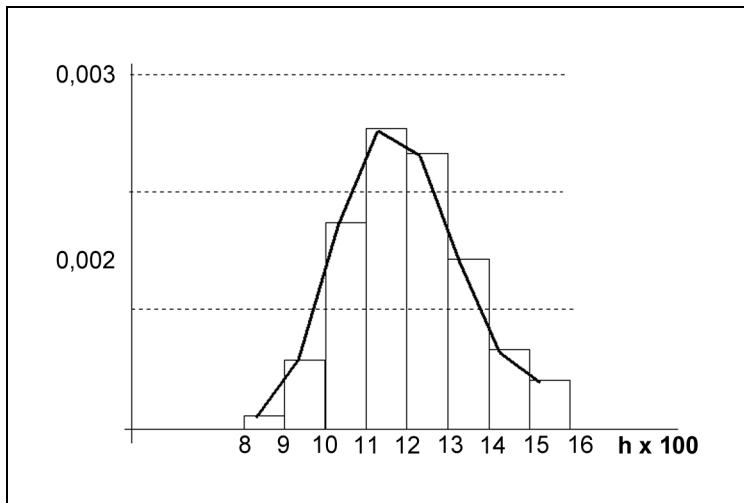
$$s^2 = 0,01(850 - 1.206)^2 + 0,06(950 - 1.206)^2 + \dots + 0,04(1.550 - 1.206)^2 = \mathbf{22.664h^2}$$

O desvio padrão (s) é dado por $\sqrt{s^2}$

$$s = \sqrt{22.664} = \mathbf{150,5h}$$

A partir dos dados, pode-se esperar que os rolamentos falhem com 1206 horas de serviço tendo uma dispersão de 150 horas, isto é, a confiabilidade destes componentes está entre 1056 e 1356 horas. De fato, somando a quantidade de peças que falharam nas classes que contém o intervalo 1056 – 1356h tem-se 82% do total, ou seja, as ações de prevenção devem ser programadas com base neste intervalo.

Histograma



Densidade de frequência relativa

O histograma é construído tendo em um eixo a densidade de probabilidade, que é calculada dividindo-se cada um dos valores de frequência relativa pelo intervalo de classe(100). Assim, a **área** de cada coluna é igual a **frequência relativa** naquele intervalo de classe. Isto permite análises mais minuciosas, como por exemplo se preciso saber qual a probabilidade de um rolamento durar mais que 1.300 horas. A resposta é dada por $0,14 + 0,07 + 0,04 = 0,25$, ou seja, 25% de probabilidade.

Funções de densidade de probabilidade

É fácil notar que se, em lugar de 200 rolamentos, o acompanhamento fosse com alguns milhares, a largura dos intervalos de classe seria de tal modo reduzida que os degraus do gráfico se transformariam em uma distribuição contínua de densidade de probabilidade. Muitos dos modos de falha tem comportamentos que se aproximam bastante das distribuições de densidade de probabilidade, de forma matemática definida, conhecidas como funções de densidade de probabilidade. Elas estabelecem modelos matemáticos dos padrões de falha, que podem ser usados em cálculos para definição de políticas e ações de manutenção.

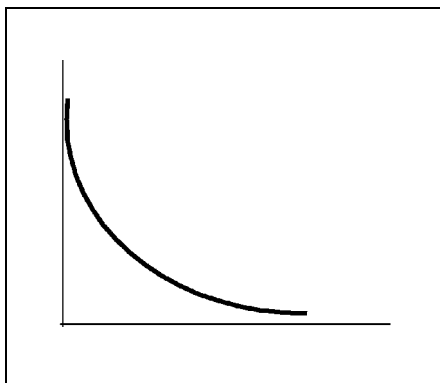
As falhas podem ser classificadas em três grupos :

- Prematuras, ou de início de operação;
- Aleatórias;
- Típicas de desgaste;

Naturalmente, cada uma delas tem suas fórmulas de média, desvio padrão, etc, aqui serão tratados somente a forma gráfica, suficiente para identificar a natureza das falhas.

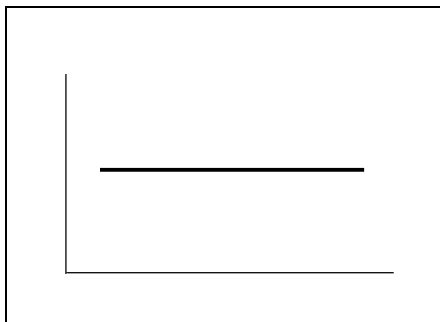
Falhas prematuras

Em muitos equipamentos encontra-se uma probabilidade de falha maior no período de entrada em operação do que em sua vida útil subsequente. Aparentemente alguns componentes são fabricados ou instalados já com defeitos, porém estes só se manifestam na entrada em operação. A função hiper exponencial define este comportamento.



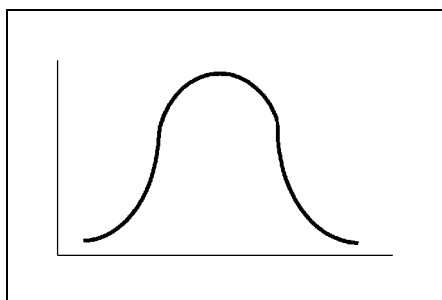
Falhas aleatórias

Muitos equipamentos ou componentes, em condições de uso, não demonstram um estágio de velhice claro, isto é, não atingem um ponto de falha por desgaste em uma época definida. Eles podem falhar imediatamente após a instalação ou muito tempo depois. Ou seja, a probabilidade de falha é constante e independente do tempo de uso, a peça se comporta como se fosse nova. Em muitos casos a falha só ocorre devido a um agente externo. A função exponencial negativa define este comportamento.



Falhas típicas de desgaste

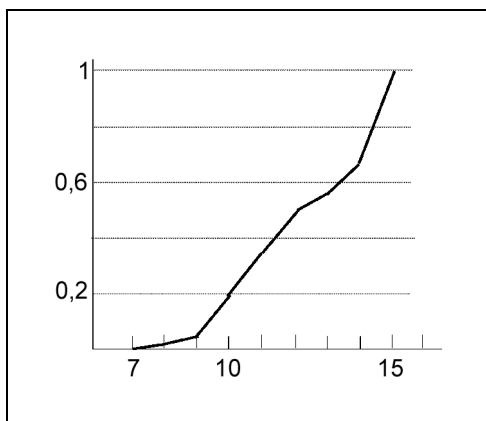
Muitos componentes tendem a falhar por desgaste em algum tempo médio de operação, tal como os rolamentos do exemplo. Obviamente alguns falharão antes e outros depois do tempo médio, dando origem ao desvio padrão. A função que define este comportamento é a função normal.



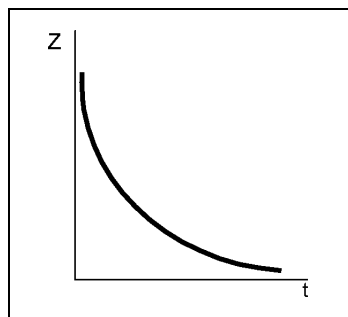
Taxa de falha em idade determinada

É a fração das peças que sobreviveram até a época(t) cuja falha é esperada no intervalo de tempo seguinte. Calcula-se a partir da fração de **falhas no intervalo após t** e da fração de **peças sobreviventes no tempo t**. A literatura técnica apresenta outras denominações tais como, taxa instantânea de falha, taxa de falha local, probabilidade local de falha, função de risco ou taxa de falha. Para o exemplo dos rolamentos tem-se a tabela e o gráfico a seguir.

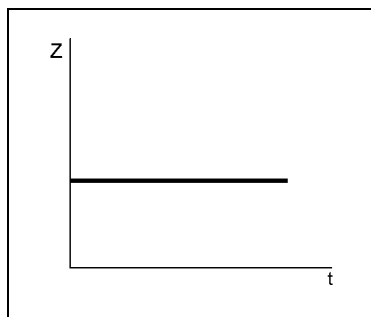
TEMPO t - horas	700	800	900	1.000	1.100	1.200	1.300	1.400	1.500	1.600
f(t) – falhas no intervalo após t	0	0,01	0,06	0,18	0,26	0,24	0,14	0,07	0,04	0
P(t) – sobreviventes no tempo t	1	1	0,99	0,93	0,75	0,49	0,25	0,11	0,04	0
Z(t) – taxa de falha na idade t	1	0,01	0,06	0,19	0,35	0,49	0,56	0,64	1	



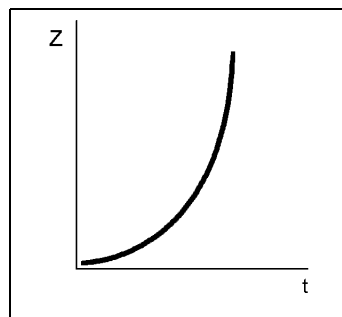
Considerando os três tipos de falhas, as curvas ficam como apresentado abaixo.



Falhas prematuras



Falhas aleatórias

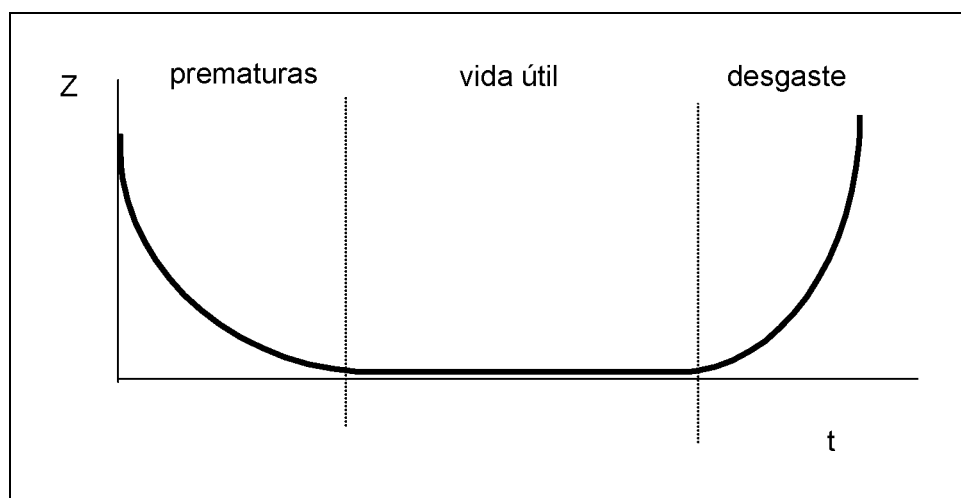


Falhas típicas de desgaste

O perfil de falha durante a vida de um equipamento

A combinação das três curvas $Z(t)$ acima produz uma única curva muito conhecida, é a **curva da banheira**. Os valores de Z e de t naturalmente variam de um componente ou equipamento para outro, sendo que para certos casos, uma ou duas fases podem não existir, como em algumas peças de aeronaves. Porém é uma curva de comportamento geral e bastante usada nos estudos de confiabilidade, uma vez que se bem determinada, principalmente a parte central, ficará claro qual método de manutenção deve ser empregado e qual o custo.

É interessante notar como os seres humanos constituem um exemplo surpreendente deste comportamento, por isso os nomes usados na unidade anterior.

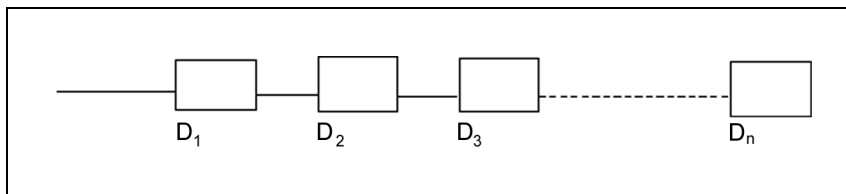


Disponibilidade de instalações

Na unidade 1 foram estudados os indicadores para um único equipamento, porém às vezes é necessário responder qual o valor da disponibilidade de uma instalação onde estão muitas máquinas e cada uma com seu valor de disponibilidade particular.

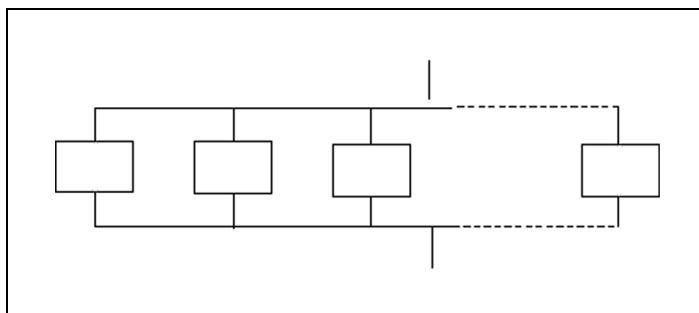
Para responder esta questão é preciso determinar como estão instaladas as máquinas para atender à produção, isto é, as máquinas podem estar em série, em paralelo ou em sistema redundante.

Máquinas em série



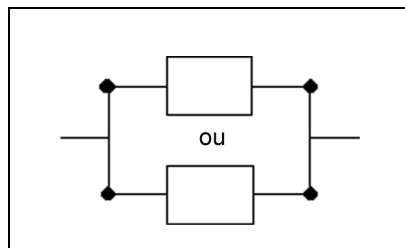
$$D_t = D_1 \times D_2 \times D_3 \times \dots \times D_n$$

Máquinas em paralelo



$$D_t = D_1 D_2 D_3 \dots D_n + [D_1 D_2 \dots D_{n-1} (1 - D_n)] + [D_1 D_2 \dots D_n (1 - D_{n-1})] + [D_1 D_2 \dots D_{n-1} D_n (1 - D_{n-2})] + \dots + [D_2 \dots D_{n-1} D_n (1 - D_1)]$$

Máquinas redundantes



$$D_t = 1 - [(1 - D_1) (1 - D_2) \dots (1 - D_n)]$$

Exemplos

Máquinas: M1 disponibilidade 90% ou 0,9
 M2 disponibilidade 80% ou 0,8
 M3 disponibilidade 95% ou 0,95
 M4 disponibilidade 85% ou 0,85

Leiaute em série

$$D_t = 0,9 \times 0,8 \times 0,95 \times 0,85 = \mathbf{0,58}$$
 ou **58%**

Leiaute em paralelo

$$D_t = 0,9 \times 0,8 \times 0,95 \times 0,85 + [0,9 \times 0,8 \times 0,95(1 - 0,85)] + [0,9 \times 0,8 \times 0,85(1 - 0,95)] + [0,9 \times 0,95 \times 0,85(1 - 0,8)] + [0,8 \times 0,95 \times 0,85(1 - 0,9)] = \mathbf{0,924}$$
 ou **92,4%**

Leiaute redundante

Considerando M1 e M2

$$D_t = 1 - [(1 - 0,9)(1 - 0,8)] = \mathbf{0,98}$$
 ou **98%**

Observações

No leiaute em **série**, a disponibilidade da instalação é sempre **menor do que a menor** disponibilidade individual.

No leiaute **redundante**, a disponibilidade da instalação é sempre **maior do que a maior** disponibilidade individual.

Enquanto que no leiaute em **paralelo**, o valor geralmente está **entre a menor e a maior** disponibilidade individual.

Manutenção baseada na confiabilidade

Processo de manutenção baseada na confiabilidade

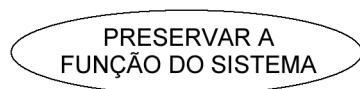
Definições:

- **Confiabilidade**
Probabilidade de que um componente, equipamento ou sistema exercera sua função sem falhas, por um tempo previsto, sob condições de operações especificadas.
- **Item**
Termo geral que designa qualquer parte, subsistema ou equipamento que possa ser considerado individualmente e ensaiado separadamente.
- **Item não reparável**
Item que não é recuperado nem reposto após ocorrência de uma falha, durante o processo de avaliação de confiabilidade.
- **Componente**
É um item que pode falhar somente uma vez. Um sistema reparável pode ser reparado pela substituição dos componentes falhos
- **Função**
Toda e qualquer atividade que o item desempenha, sob o ponto de vista operacional.
- **Falha**
Perda de uma função.
- **Falha Funcional**
Incapacidade de qualquer item em atingir o padrão de desempenho esperado.
- **Causa de Falha**
Circunstancia que induz ou ativa um mecanismo de falha.
- **Modo de Falha**
Conjunto de efeitos pelos quais uma falha é observada.

- **Vida útil**

Intervalo de tempo durante o qual um item desempenha sua função com a taxa de falha especificada, ou até a ocorrência de uma falha não reparável.

Paradigma central



Manutenção baseada na confiabilidade

- É um novo método para o planejamento da manutenção em uma instalação industrial complexa
- Integram as diversas formas de manutenção
- Visa o racionalizar e otimizar o Plano de Manutenção da Instalação.

De onde surgiu?

- Desenvolvida no início da década de 70 pela industria aeronáutica americana
- Amplamente empregada pelas forças armadas americanas e de outros países
- Atualmente sendo utilizada em larga escala pela industria nuclear nos EUA e na França
- Usada também pela industria do petróleo, principalmente na área *offshore*.

Manutenção tradicional x MCC

Manutenção tradicional	MCC
Focalizada no equipamento	Focalizada no sistema
Manter o equipamento	Preservar a função do sistema
Tarefas indicadas com base "no que pode ser feito"	Tarefas indicadas com base "no que deve ser feito e porque"
Não enfatiza a coleta e a utilização de dados de falhas	Prioriza fortemente a coleta e análise continua de dados de falhas

Quatro elementos exclusivos da MCC

- Preservação da função do sistema
- Identificação das falhas funcionais e dos modos de falhas dominantes
- Identificação dos tipos de tarefa de manutenção potencialmente adequados através de um diagrama de decisão
- Seleção de tarefas aplicáveis e eficazes.

Os erros humanos tem sido a grande preocupação de sistemas aeroespaciais, sistemas nucleares, sistemas petroquímicos e muitos outros sistemas, desde a sua concepção até a sua operação.

Na realidade, alguém pode dizer que até 90% de todas as falhas de equipamentos podem ser atribuídas de uma forma ou de outra ao erro humano.

De qualquer forma, a falha humana tem provocado uma grande diminuição da eficiência dos mais diversos sistemas e isto, após ter sido feito um excelente projeto e uma correta fabricação, terem sido executados os testes e ter sido dada a aprovação pelo Controle de Qualidade dos equipamentos em questão.

A maior parte dos esforços visando 'a confiabilidade esteve direcionada para as maquinas e para os seus componentes.

Porém, ao se esquecer de levar em conta à falha humana, deixa-se de reduzir de pelo menos 50% a eficiência do sistema utilizado.

Se a confiabilidade do nosso sistema tem melhorado substancialmente nas ultimas três décadas, só a partir do inicio da década de 70, é que se começou a preocupar com a confiabilidade humana no sentido de quantifica-la e aumenta-la.

Confiabilidade humana

Pode-se definir a confiabilidade humana simplesmente como a probabilidade que uma tarefa ou serviço (uma ação planejada) seja feito com sucesso (alcançando os objetivos propostos) dentro do tempo reservado para o mesmo.

O erro humano pode ser definido como: falha de ações planejadas em alcançar os objetivos propostos.

Existem duas causas para o erro:

- As ações não ocorrem como planejadas;
- O planejamento foi inadequado.

Os principais benefícios da manutenção baseada em confiabilidade:

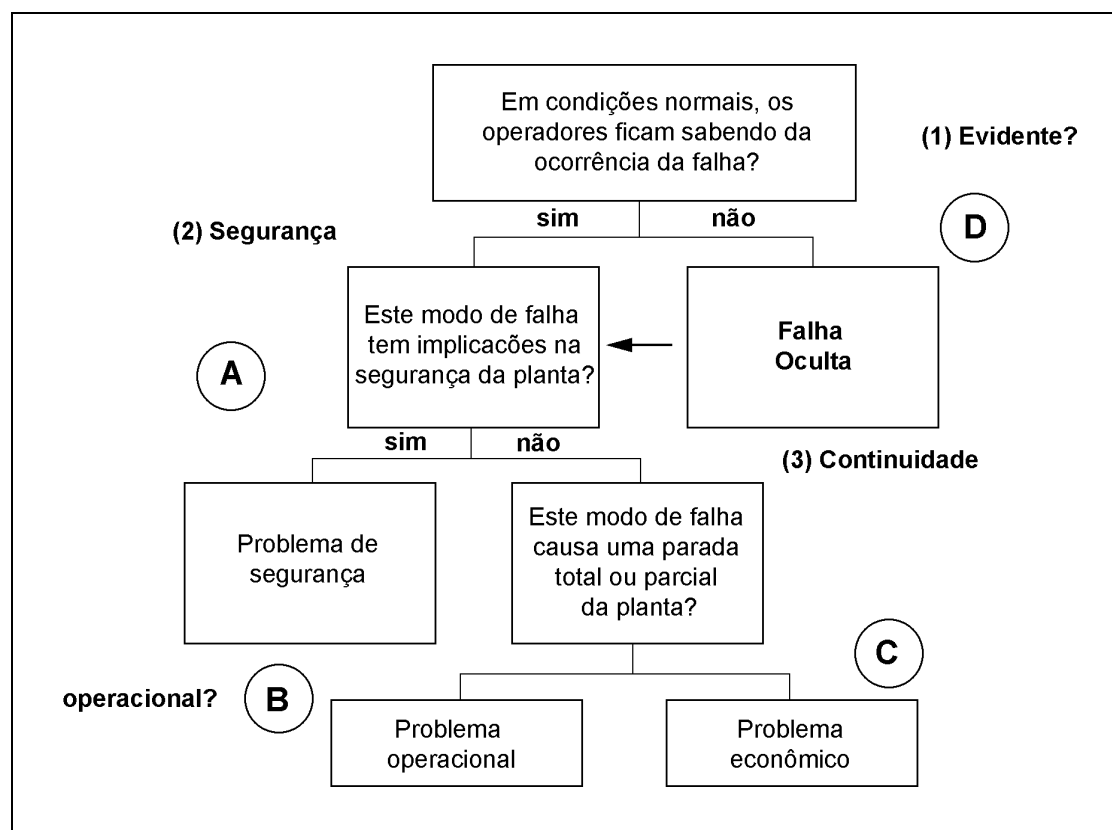
- Fornece bases racionais para o Planejamento da Manutenção
- Redução do custo da manutenção, particularmente da manutenção preventiva;
- Aumento da disponibilidade da instalação;
- Permite o rastreamento das decisões;
- Prove uma base sistemática para o processo de melhoria continua.

Fluxograma de decisão

Análise pelo fluxograma de decisão

Classificação dos modos de falha segundo suas conseqüências:

- Evidentes ou ocultas;
- Segurança/ambiental, operacional ou econômica;
- Modos de falha com conseqüências meramente econômicas são fortes candidatos à Manutenção Corretiva (MC)
- Estabelece a classificação:
 - A ou D/A
 - B ou D/B
 - C ou D/C

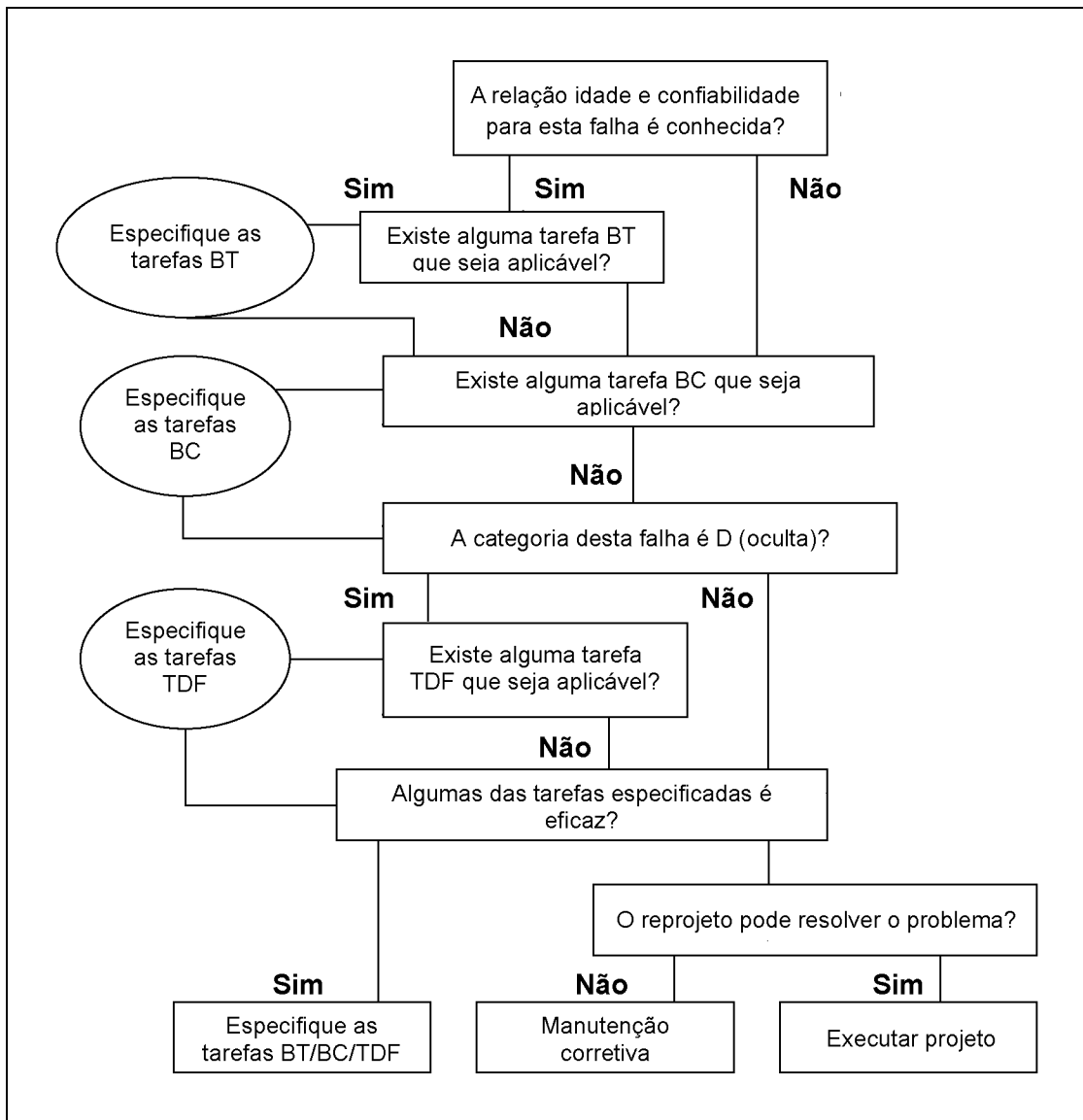


Classificação dos modos de falha

Seleção de tarefas

Listar as tarefas candidatas que atendam ao critério:

- **Aplicável:** a tarefa previne ou mitiga a falha, detecta o início do processo de falha, ou descobre uma falha oculta;
- **Eficaz:** a tarefa é a opção mais custo-eficiente dentre as tarefas candidatas comparadas à alternativa de MC.
- Selecionar a mais custo-eficiente;
- Estabelecer periodicidade: BT, BC, TDF



Planilha de fluxograma de decisão

Risco

Inspeção baseada em risco

O método de inspeção baseada em risco (RBI – Risk Based Inspection) foi desenvolvido para ajudar a:

- Determinar o equipamento de maior risco;
- Projetar um programa de inspeção que não somente descubra corrosão mas também reduza o risco de falha no equipamento.

Com ajuda deste método pode-se eficazmente em custo, reduzir o risco de um evento catastrófico resultante da falha de equipamento pressurizado (refinarias, plantas petroquímicas, etc...)

Sabe-se que todo equipamento contem defeitos; num sentido pratico não há equipamento fabricado perfeito. Felizmente, a maioria dos defeitos é inócua e compreende o que poderia ser apresentado como uma "acumulação fortuita" de defeitos.

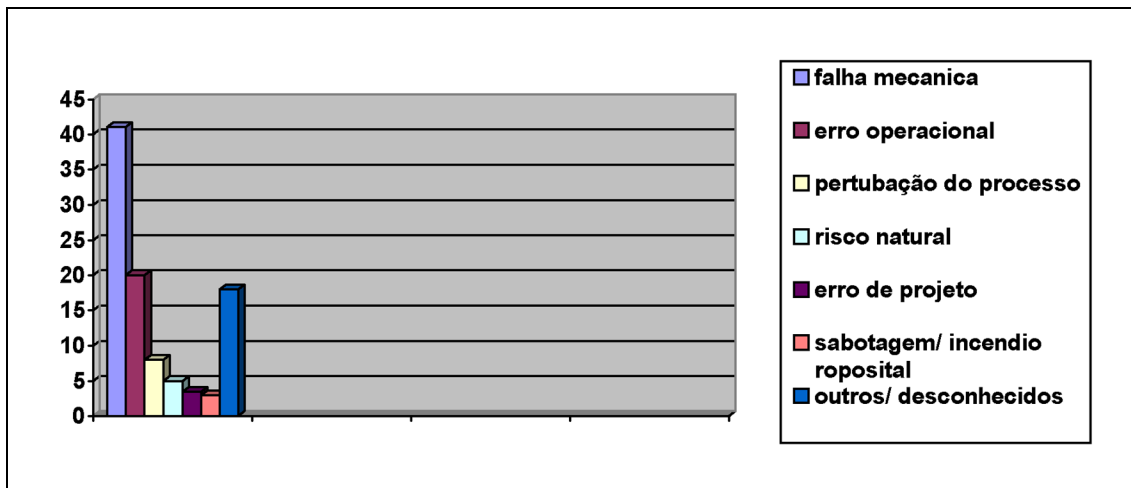
O equipamento da industria de processamento também contem muitos defeitos ; a maioria é inofensiva, alguns poucos podem levar a vazamentos, e extremamente poucos podem levar a falhas catastróficas. O desafio é encontrar, eficazmente em custo, aqueles poucos defeitos críticos que podem levar 'a falhas principais.

Exemplo

Uma análise de RBI de uma planta de refinaria de fracionamento de gás pode produzir uma lista priorizada de, por exemplo, 600 equipamentos, incluindo todos os acessórios de tubulação. A lista indica que 80% do risco de falha estão associados com somente 20% do equipamento, e a análise determina quais dos itens individuais do equipamento estão neste topo de 20%. Estes resultados dizem onde focar os recursos de inspeção e teste para evitar as falhas de risco mais alto.

Como um exemplo , a análise RBI poderia revelar que a linha aérea de 12 polegadas do depropanizador esta classificada em 18º na lista priorizada de risco, e que, se ela falhar, os 25.000 pés quadrados da planta estariam sob risco de destruição a partir de uma possível explosão de nuvem de vapor. Com esta informação , pode-se concentrar mais recursos em prevenir a falha desta linha aérea ou naquelas outras peças de equipamentos que sejam de "alto risco", compelindo pelas conseqüências potencialmente sérias.

De acordo com um relatório, dos 170 principais prejuízos patrimoniais na indústria de processamento durante os últimos 30 anos, mais da metade foram causados por falhas mecânicas do equipamento (gráfico 1).

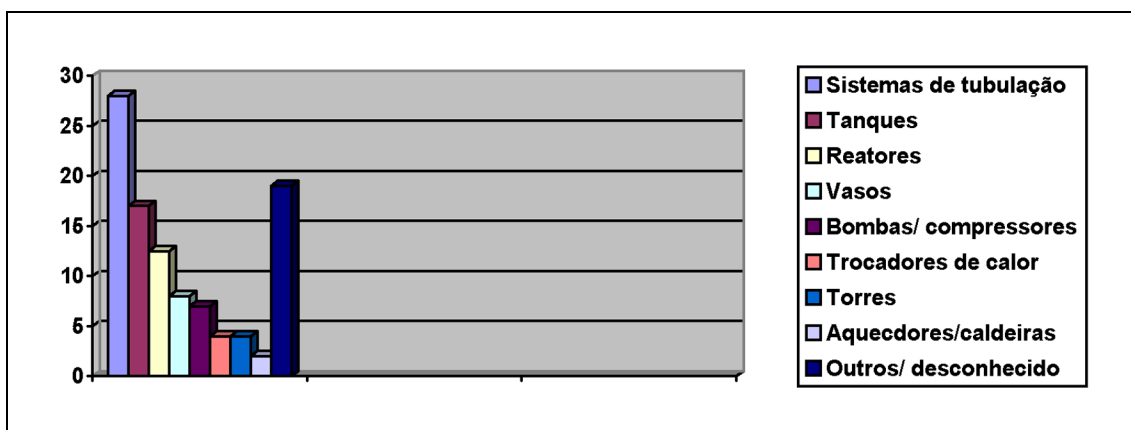


Mais de 80% daqueles prejuízos foram causados pela falha de equipamento pressurizado tal como tubulação, vasos, torres, reatores, tanques, bombas e trocadores de calor.

A metodologia de inspeção baseada em risco é focalizada nesses equipamentos, incluindo o potencial de falha de selos de bomba.

A frequência e custo daqueles 170 prejuízos maiores cresceram significativamente ao longo dos últimos 30 anos. A aplicação de inspeção baseada no risco deve reduzir estes prejuízos atribuídos a falha mecânica.

Desenvolvimento do método



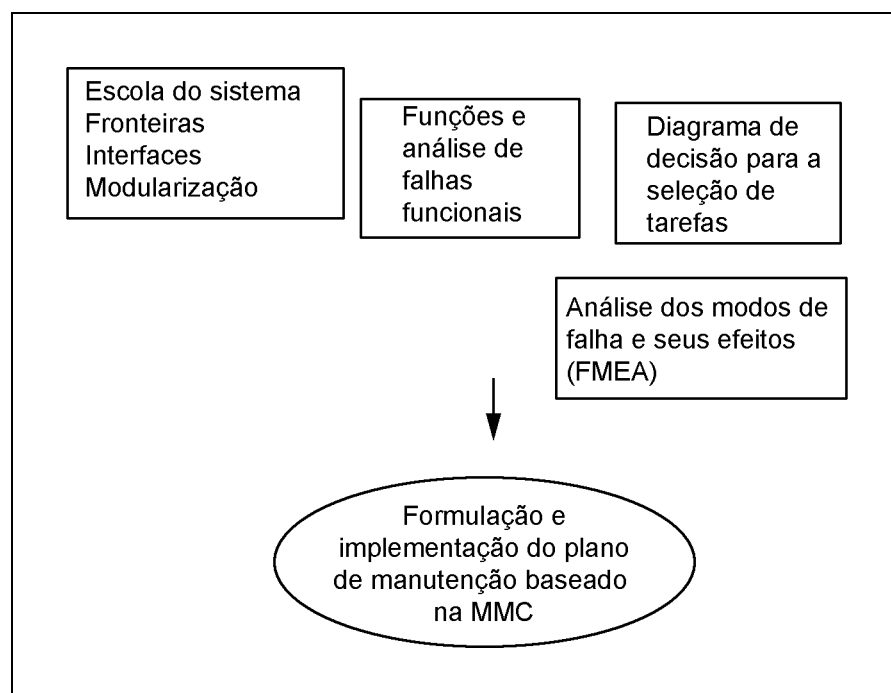
A metodologia da inspeção baseada em risco foi desenvolvida por um grupo de 16 companhias petroquímicas que conjuntamente patrocinaram o desenvolvimento através do API.

Foi desenvolvido um documento de recursos básicos denominado prática recomendada (API RP 580). A publicação da prática recomendada é de 1997, quando os detalhes do método ficaram disponíveis para a indústria em geral.

O primeiro passo na aplicação da RBI é a classificação qualitativa do risco das unidades de processo, ou segmentos delas, utilizando uma matriz de risco .

Etapas de implantação

Objetivo: Introduzir e discutir detalhadamente os conceitos necessários para a implantação da MCC, em todas as suas etapas



Visão geral do processo de MCC:



Etapas do processo de MCC:

1º Parte:

- Seleção do sistema e coleta de informações;
- Definição das fronteiras e interfaces do sistema
- Modularização do sistema
- Análise das Falhas Funcionais (AFF) dos módulos
- Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)

2º Parte

- Classificação dos Modos de Falha (Diagrama de Decisão)
- Seleção de Tarefas de Manutenção (Diagrama de Decisão)
- Teste de Validação de Corretivas

Seleção do sistema

Principais candidatos

- Alto custo de MP
- Muitas ações de MC nos últimos anos
- Responsáveis por parcela significativa da indisponibilidade da planta
- Implicações de segurança
- Projetos novos.

1º Coleta de informações

- Fluxogramas de engenharia (P&ID's)
- Memorial descritivo
- Manual de operação do sistema
- Manuais de vendedores dos equipamentos
- Registros históricos de ocorrências
- Dados de falhas e de reparo
- Plano de MP existente

Definição das fronteiras e interfaces do sistema

Por que é importante?

- Para que nada seja deixado de fora inadvertidamente
- Fronteiras são fundamentais para se poder estabelecer as interfaces de entrada e saída do sistema
- As interfaces de saída estão relacionadas com as falhas funcionais do sistema
- As interfaces de entrada representam fluxos que devem ser considerados como "existentes" na análise

- Não há regra fixa para o estabelecimento das fronteiras
- A definição pode ser feita, delimitando-se as fronteiras sobre um fluxograma de engenharia.

Modularização do sistema

- Descrição do sistema
- Divisão em "módulos funcionais" ou subsistemas
- Um "modulo funcional" consiste de um grupo de componentes que atuam conjuntamente para desempenhar uma ou mais funções próprias do grupo

Exemplo

Em um sistema de compressão de gases, tem-se tipicamente:

- Motor
- Compressor propriamente dito
- Sistema de refrigeração
- Sistema de lubrificação
- Sistema de controle
- Identificar todas as Interfaces de entrada e saída de cada modulo
- Relacionar todos os equipamentos mecânicos, elétricos, de instrumentação, etc., que compõem cada modulo funcional.

A modularização permite que toda a função do sistema seja considerada de um modo racional e, também, que todos os componentes estejam explicitamente relacionados com as funções identificadas.

Análise das falhas funcionais (AFF) dos módulos

Princípio básico da MCC → preservar a função

Definir claramente todas as funções e não apenas aquelas que parecem mais importantes à primeira vista.

Normalmente os fluxos de saída estão associados a funções do sistema

Uma vez definidas as funções, pode-se passar à definição das falhas funcionais.

Todo item tem usualmente mais de uma função dentro de um sistema, sendo:

- **Principais**

Representam a razão básica para a sua existência de um item

Ex: Item: Bomba

Função principal: Bombear água de um reservatório

- **Secundárias**

São menos óbvias do que as principais, mas suas falhas podem ter sérias consequências. Às vezes mais sérias do que a falha da função principal

Ex: Item : Bomba de amônia

Função principal: Bombear amônia do tanque para o reator

Função secundária: Conter a amônia

Funções e padrão de desempenho

Indicadores de desempenho

Os indicadores de desempenho são parâmetros utilizados para avaliar a eficiência dos trabalhos de manutenção. Os índices mais utilizados são: TMPR, TMEF e a disponibilidade.

Existem ainda os Indicadores de Custos, que avaliam os custos diretos e indiretos da manutenção. Normalmente os Indicadores de Custo relacionam o custo de manutenção com o faturamento total da empresa ou com a unidade de produção (Ex. toneladas de produção).

Estudo de falhas

Falha

A Falha corresponde à perda da função de um equipamento. A condição de funcionamento de um equipamento pode ter critérios diferenciados. Por exemplo, na atualidade a agressão ao meio ambiente pode impedir o funcionamento de um equipamento, sendo uma condição de falha.

Diagnóstico de falha

O Diagnóstico da Falha consiste na identificação do mecanismo que provocou a falha do equipamento. A identificação da causa da falha é fundamental para a garantia de desempenho. Atualmente existem diversas técnicas que podem auxiliar na análise da falha de uma máquina. Estas técnicas de manutenção envolvem desde o conhecimento básico dos equipamentos até a utilização de instrumentos sofisticados.

Confiabilidade

Confiabilidade é a probabilidade de que um equipamento, célula de produção, planta ou qualquer sistema funcionar normalmente em condições de projeto, por um determinado período de tempo estabelecido. A curva da banheira, representa o modelo tradicional da relação entre o tempo e a taxa de falha de um equipamento ou parte dele. As taxas de falhas (λ_i), que representam o número de falhas (N_i) num determinado período de tempo (T), se comportam de maneira diferente no decorrer da vida do equipamento. Basicamente há três períodos distintos:

- **Período da falha prematura:** É caracterizado pelas elevadas taxas de falhas no início da utilização. Normalmente estas falhas são resultantes de deficiências de projeto, fabricação, erros de operação e outras causas. Algumas vezes é possível reduzir estes tipos de falha através da utilização de testes planejados antes da liberação final do equipamento.
- **Período da taxa de falha constante:** Neste período as falhas resultam de limitações inerentes de projeto mais os acidentes causados por operação ou manutenção inadequadas. Estas falhas podem ser evitadas pela atuação correta da operação e manutenção dos equipamentos.
- **Período do desgaste acelerado:** Estas falhas ocorrem em função da própria idade dos componentes do equipamento. A Taxa de Falha aumenta progressivamente, colocando em risco a segurança e a produção. Os custos crescentes de manutenção e as perdas de produção podem definir o fim da vida útil. Com a velocidade da evolução da tecnologia o equipamento pode tornar-se obsoleto.

Existem três leis estatísticas que são utilizadas para a previsão da confiabilidade “ajustando” os fenômenos de aparição de falhas. A lei “normal” de Gauss, a lei exponencial e a lei de Weibull.

A Confiabilidade, definida em função da Taxa de Falha λ , pode ser obtida na expressão da lei exponencial da seguinte forma:

$$C_{(t)} = e^{-\lambda t}$$

Sendo:

t = intervalo de tempo considerado.

e = logaritmo neperiano (2,718).

Para esta expressão a Taxa de Falha de cada componente é constante.

O tempo médio entre falhas (TMEF) é definido por:

$$\text{TMEF} = \int_0^{\infty} C_{(t)} dt$$

A Confiabilidade de uma instalação é influenciada pela taxa de falha individual dos componentes e pela configuração utilizada. Estas configurações podem associar os componentes em série, em paralelo ou com reserva (stand by).

O inverso da confiabilidade seria a probabilidade do componente ou sistema falhar. A definição de falha, no contexto da confiabilidade, é:

"Impossibilidade de um sistema ou componente cumprir com sua função no nível especificado ou requerido".

Tradicionalmente, as fases da vida de um componente ou sistema são descritos pela curva de banheira. Porém, antes de discuti-la é necessário definir o que vem a ser taxa de falhas:

"Frequência com que as falhas ocorrem, num certo intervalo de tempo, medida pelo número de falhas para cada hora de operação ou número de operações do sistema ou componente".

A taxa de falhas é normalmente representada por λ .

O inverso da taxa de falhas é conhecido o Tempo Médio Entre Falhas (TMEF), ou MTBF. A representação matemática do TMEF é:

$$\text{TMEF} = \frac{1}{\lambda}$$

Falha funcional

É a incapacidade de um item em atender o desempenho desejado num dado contexto operacional.

Exemplo

Um alto consumo de óleo numa turbina de avião pode não ser problema em um voo curto, mas este mesmo consumo pode esgotar o combustível num voo longo

Se a função principal de uma máquina é empacotar 75 sacos/min, com 250 (+/-) 1g de balas por saco, qualquer desempenho fora deste padrão é considerada falha

- Máquina para totalmente
- Sacos com mais de 251g
- Menos de 75 sacos/min
- Sacos com menos de 249g

Exemplo de planilha de análise de falha funcional

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade		
Análise das Falhas Funcionais	Revisão: 0	Data: 25/05/2006
Sistema: Geração de energia elétrica	ID do Sistema: SGEE	
Subsistema: Partida	ID do subsistema: SP	
Analistas: Grupo de trabalho (GT)		
1. Funções: 1.1 - Fornecer torque para girar a turbina na seqüência de partida. 1.2 - Fornecer torque para girar a turbina em "crank"		
2. Falhas Funcionais: 2.1 - Não fornecer torque para a partida 2.2 - Não fornecer torque para girar a turbina em "crank"		

Relação componente/falha funcional

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade				
Matriz Componente por Falha Funcional				
Sistema:	Subsistema:			
Preparado por:	Data:	Rev.:		
Componentes:				

Análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA)

Relacionar os modos de falha dos componentes e subsistemas (módulos) de um sistema;

Identificar os efeitos dessas falhas sobre o sistema.

Empregada usualmente em estudos de:

- Confiabilidade
- Qualidade Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC)

Objetivos

- Definir para cada falha funcional, quais os modos de falhas relevantes dos componentes;
- Estabelecer as possíveis causas de todos os modos de falhas;
- Indicar os componentes a que deverão ser submetidos ao diagrama de decisão e quais os que serão colocados na lista de Manutenção Corretiva.

Modo de falha

- Maneira pela qual a falha é observada (Mil-Std 1629 A)
- Efeito pelo qual se percebe que a falha ocorreu (IEE Std 500)
- Descreve as variações do estado de um componente que resultam da ocorrência da falha (OREDA)

Exemplos

- Ruptura (falha estrutural)
- Entupimento
- Falha em permanecer numa posição
- Falha em abrir (falha estrutural)
- Falha em fechar (falha estrutural)
- Falha em parar
- Fluxo restrito
- Falha em parar
- Falha em partir Vazamento interno
- Vazamento externo
- Falha fora da tolerância
- Atuação falsa
- Indicação errada
- Operação indevida

- Curto (elétrico)
- Fuga (elétrico)

Modo de falha

Em geral, os modos de falha estão relacionados com uma das seguintes situações:

- Operação prematura
- Falha em operar num tempo especificado
- Falha em parar de operar num tempo especificado
- Falha durante a operação

Causas

Possíveis mecanismos físicos ou químicos, erros de projeto, defeitos de qualidade, ou outros processos que são a razão básica para a ocorrência do modo de falha.

- Sobretensão
- Corrosão
- Fadiga
- Falta de lubrificação
- Desgaste
- Abrasão
- Fricção
- Choque mecânico/térmico
- Vibração
- Sujeira/poeira

Efeitos

Conseqüências que um modo de falha impõe na operação, função ou estado de um componente ou sistema

- Ruído excessivo
- Perda de potência
- Vazamento (sistema)

Tarefas

Seleção de tarefas

Listar as tarefas candidatas que atendam ao critério:

- **Aplicável:** a tarefa previne ou mitiga a falha, detecta o início do processo de falha, ou descobre uma falha oculta;

- **Eficaz:** a tarefa é a opção mais custo-eficiente dentre as tarefas candidatas comparadas à alternativa de MC.
- Selecionar a mais custo-eficiente;
- Estabelecer periodicidade: BT, BC, TDF

MCC Seleção de tarefas																
Sistema:						Subsistema:										
Função:			Falha funcional:													
Preparado por:								Data:								
Componente/ Modo de falha	Causa da falha	Análise de criticidade				Guia de seleção							Tarefas candidatas	Tarefa selecionada /tipo	Freq. estim.	
		Evid	Seg	Oper.	Categ.	1	2	3	4	5	6	7				

Planilhas

Planilha de análise de falha funcional

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade			
Análise das Falhas Funcionais		Revisão	Data:
Sistema:		ID do Sistema:	
Subsistema:		ID do subsistema:	
Analistas:			
1. Funções:			
2. Falhas Funcionais:			

Exemplo de planilha de análise de falha funcional

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade		
Análise das Falhas Funcionais	Revisão: 0	Data: 25/05/2006
Sistema: Geração de energia elétrica	ID do Sistema: SGEE	
Subsistema: Partida	ID do subsistema: SP	
Analistas: Grupo de trabalho (GT)		
2. Funções: 1.1 - Fornecer torque para girar a turbina na seqüência de partida. 1.2 - Fornecer torque para girar a turbina em "crank"		
2. Falhas Funcionais: 2.1 - Não fornecer torque para a partida 2.2 - Não fornecer torque para girar a turbina em "crank"		

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade			
Matriz componente por Falha Funcional			
Sistema: Geração de Energia Elétrica		Subsistema: Partida	
Preparado por: Grupo de Trabalho (GT)		Data: 25/05/2006	Rev.: 0
Componentes	1.1	2.1	
CUBO E ACOPLAMENTO DO MOTOR DE PARTIDA	X	X	
B-330, MOTOR DE PARTIDA AC	X	X	
VFD-430, MODULO ELETRONICO DE VARIAÇÃO DE FREQUENCIA PARA O MOTOR DE PARTIDA	X	X	

ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHAS (FMEA)				
Sistema:		Subsistema:		
Função:				
Falha funcional:			Data:	
Componente	Modo de falha	Causa da falha	Efeitos das falhas	D.D.

Exemplo de uma planilha de FMEA

ANALISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHAS (FMEA)				
Sistema: Geração de Energia Elétrica			Subsistema: Partida	
Função: Fornecer torque para girar a turbina na seqüência de partida				
Falha funcional: Não fornecer torque para a partida			Data: 25/05/2006	
Componente	Modo de falha	Causa da falha	Efeitos das falhas	D.D.
Cubo e acoplamento do motor de partida	1 Quebra	Defeito de material	Impede o giro da turbina	N
B-330, Motor de partida AC	1 Falha na partida (não gira)	-Travamento mecânico (rolamento)	Impede o giro da turbina	S
VFD-430, modulo eletrônico de variação de freqüência para o motor de partida	1 Fornece sinal inadequado m (não varia a tensão)	Falha no sistema de comando digital	Impede o giro da turbina	S

MCC Seleção de tarefas													
Sistema:						Subsistema:							
Função:			Falha funcional:										
Preparado por:						Data:							
Componente/ Modo de falha	Causa da falha	Análise de criticidade				Guia de seleção					Tarefas candidatas	Tarefa selecionada/ tipo	Freq. Estim.
		Evid.	Seg.	Oper.	Categ.	2	3	4	5	6			

Sistema de informações

Coleta e análise de dados de falhas

Que tipos de dados são necessários em uma análise de confiabilidade?

- Taxa de falhas
- Tempo médio de reparo
- Intervalo entre testes
- Duração do teste
- Freqüência de manutenção preventiva
- Duração média da manutenção preventiva
- Probabilidade de erro humano

Pode ser encontrado em inúmeros bancos de dados genéricos:

- AIChE
- OREDA
- IEEE-500
- NPRD-95
- MIL HDBK-217F
- ISA S-84

AIChE - *American Institute of Chemical Engineers*

“Guidelines for Data Collection...”

Contem taxas de falhas de componentes utilizados em plantas de processos.

OREDA - *“Offshore Reliability Data”*

Contem taxas de falhas típicas de componentes utilizados em instalações “offshore”.

IEEE-500 - *Institute of Electrical and Electronic engineers*

“IEEE Standard 500 - 1984”

Contem taxas de falhas de componentes elétricos, de alguns eletrônicos e de instrumentação.

NPRD-95 - *Reliability Analysis Center*

Contem taxas de falhas de uma ampla variedade de componentes mecânicos e eletromecânicos, coletados de fontes comerciais e militares.

Pode ser encontrado em bancos de dados genéricos computadorizados:

- SYSREL (S.R.D. – U.K.)
- EURODATA

Pode ser obtida com alguns fabricantes

- Maioria fornece MTBF
- Pode ser obtida por meio da análise de dados extraídos da experiência operacional da planta

Tempo médio de reparo

- Deve ser obtido da experiência operacional da planta em análise
- Específico de cada instalação: depende de procedimentos administrativos, recursos humanos e materiais, logística, etc.

Outros dados

- Intervalo entre testes
- Duração do teste
- Frequência de manutenção preventiva
- Duração média da manutenção preventiva
- Devem ser informados pelos responsáveis pela instalação em análise.

Probabilidade de erro humano

- Em caso de tarefas complexas, pode ser obtida através de uma análise de confiabilidade humana;
- Tarefas simples: valores publicados em manuais específicos.

Coleta de dados de falhas

Para um dado componente:

- Levantar tempos de funcionamento, ou seja, entre partida e parada
- Toda partida é uma partida, mas nem todas as paradas são iguais

Exemplo

Partida	Parada	Tempo P (dias)	Causa da Parada
01/01/05	05/03/05	64	Falha
08/01/05	28/04/05	110	Faltou matéria prima
05/02/05	26/10/05	261	Falha
22/02/05	24/07/05	152	Falha
25/02/05	25/08/05	180	Falha do trocador HX-001
		320	Falha
		130	Parada para preventiva
		287	Falha
		48	Falha
		590	Falha
		202	Incendio na fabrica

7 tempos até falhar e 4 suspensões.

Referências

FARIA, J.G. de Aguiar. **Administração da Manutenção**. São Paulo: Edgard Blücher, 1994. 111p.

KARDEC, Alan; CARVALHO, Claudio. **Gestão Estratégica e Terceirização**. Rio de Janeiro: ABRAMAM, 2002. 104p. (Manutenção; 1).

KARDEC, Alan; LOUBERT, Flores; EDUARDO, Seixas. **Gestão Estratégica e Indicadores de Desempenho**. Rio de Janeiro: ABRAMAM, 2002. 120p. (Manutenção; 6).

KARDEC, Alan; NASCIF, Julio; BARONI, Tarcísio. **Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas**. Rio de Janeiro, 2002. 160p. (Manutenção; 2).

KARDEC, Alan; ZEM, Milton. **Gestão Estratégica e Fator Humano**. Rio de Janeiro: ABRAMAM, 2002. 116p. (Manutenção; 5).

KARDEC, Alan; LAFRAIA, João Ricardo. **Gestão Estratégica e Confiabilidade**. Rio de Janeiro: ABRAMAM, 2002. 112p. (Manutenção; 4).

KARDEC, Alan; RIBEIRO, Haroldo. **Gestão Estratégica e Manutenção Autônoma**. Rio de Janeiro: ABRAMAM, 2002. 136p. (Manutenção; 7).

KARDEC, Alan; ARCURI, Rogério; CABRAL, Nelson. **Gestão Estratégica e Avaliação do Desempenho**. Rio de Janeiro: ABRAMAM, 2002. 136p. (Manutenção; 3).

MANUTENÇÃO. Rio de Janeiro: ABRAMAM, 2004- .

MIRSHAWKA, Victor. **Manutenção Preditiva**. São Paulo: McGraw-Hill, 1991. 318p.

NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de Manutenção Preditiva. Vol. 1.** São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 501p.

NEPOMUCENO, L.X. **Técnicas de Manutenção Preditiva. Vol. 2.** São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 501p.

Nova manutenção y qualidade. Rio de Janeiro: Novo Pólo, 2004- .

REVISTA M&T – **Manutenção & tecnologia.** São Paulo: SOBRATEMA, 2004- .