



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**CARATERIZAÇÃO DE PARTICULAS DE DESGASTE DOS
ROLAMENTOS POR FERROGRAFIA E FERROMETRIA.**

VITORINO MENDES DE PINA



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARATERIZAÇÃO DE PARTICULAS DE DESGASTE DOS ROLAMENTOS POR FERROGRAFIA E FERROMETRIA.

VITORINO MENDES DE PINA

1110054

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Manuel Jorge Soares de Castro, Professor Adjunto do Departamento em Engenharia Mecânica do ISEP e co-orientação da Eng^a Beatriz Maria da Mata Graça, Directora do Laboratório de Análise de Lubrificantes do CETRIB/INEGI.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta, só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Aproveito desde já para prestar os meus mais sinceros agradecimentos:

Aos meus pais Isidoro C. de Pina e Amélia M. Oliveira e à minha tia Susana M. Oliveira por todo o apoio, afeto, carinho e pela compreensão demonstrada.

A minha companheira de luta Ânia Raquel que foi a principal responsável por voltar a estudar e por todo o apoio nos momentos mais difíceis. Aproveito também agradecer aos seus pais O Sr. João Moreira e Dona Maria de Fátima pelo apoio financeiro, moral e incentivo.

À minha princesinha Dânia Sofia que é a inspiração da minha vida.

Ao Professor Doutor Manuel Jorge Dores de Castro, orientador da minha Tese de Mestrado, pela sua dedicação, paciência, disponibilidade e pelos conhecimentos transmitidos para a realização deste trabalho.

À Eng^a Beatriz Maria da Mata Graça, co-orientador da minha Tese de Mestrado, pelo tempo disponibilizado pelo acompanhamento paciência e conhecimentos transmitidos.

Ao INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial), por me ter dado a oportunidade de realizar este trabalho, disponibilizando todo o material disponível para a realização do mesmo.

A todos que directa e indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado a todos.

Palavras-chave

Rolamentos, Ferrografia de Leitura Direta, Ferrografia Analítica, Análise de Avarias, Partículas de Desgaste.

Resumo

Avarias em rolamentos são causas comuns de falhas em máquinas e equipamentos industriais. Portanto, é importante a aplicação de técnicas que permitam a detecção e a identificação do problema o mais cedo possível a fim de evitar a destruição do rolamento e consequente paragem da máquina. Logo, o processo de monitorização do estado dos rolamentos deve receber uma atenção especial no plano de manutenção de qualquer indústria.

Este trabalho tem, assim, como principal objetivo a caracterização das partículas de desgaste provenientes de rolamentos através da análise dos seus lubrificantes por ferrometria e ferrografia analítica. Estas técnicas permitem identificar e caracterizar as várias partículas de desgaste presentes numa amostra de lubrificante, permitindo não só avaliar o grau de severidade do desgaste mas também identificar o tipo de desgaste predominante (fadiga, abrasão, corrosão, etc.), e até identificar os diferentes materiais das partículas que se podem associar a componentes específicos com falhas.

A criação de uma base de dados para armazenar os resultados, os comentários e as informações mais importantes obtidos nos ensaios experimentais, assim como a análise de alguns casos práticos, foram também realizados no âmbito deste trabalho.

Para desenvolver um conhecimento mais profundo sobre as técnicas utilizadas foi importante fazer uma análise aos diversos tipos de rolamentos, a sua lubrificação e as causas e tipos principais de avarias encontradas.

Keywords

Bearings, Direct Reading Ferrograph, Analytical Ferrograph, Wear Particles, Failure analysis.

Abstract

Failures in rolling bearings are common causes of severe damages in machinery and industrial equipment. Therefore, it is necessary to apply techniques that allow detection and identification of the problem as soon as possible in order to avoid destruction of the bearing and thereby shutdown of the machine. So, the rolling bearing condition monitoring should receive special attention in the maintenance plan of any industry.

The main objective of this work was the characterization of wear particles from rolling bearings by lubricant analysis and more specifically by ferrometry and analytical ferrography. These techniques allow to identify and characterize the various wear particles present in a sample of lubricant , allowing not only to assess the severity of wear or damage but also to identify the type of predominant wear (fatigue , abrasion , corrosion etc.) and to identify different materials that can be associated with specific components failed .

The creation of a database to store the results, and reviews of the most important information obtained from the experimental tests as well as the analysis of some case studies were also carried out in this work.

To understand the lubricant analysis techniques it was important to analyze several types of bearings, their lubrication and the causes and major types of failures found in rolling bearings.

Lista de Símbolos

EP - extrema pressão
AW - anti desgaste
EHD - regimes elastohidrodinâmico
E* - módulo de Young equivalente
R_x - raio equivalente
a - semi-largura do contacto
p_o - pressão de contacto máxima
p_m - pressão média
A, B - curvaturas equivalentes
R_x, R_y - raios de curvatura
R_c - razão da curvatura
b - semi-comprimento do contacto
U - parâmetro velocidade
G - parâmetro material
W - parâmetro carga
h₀ - espessura do filme lubrificante no centro de um contacto linear
h_m - espessura mínima do filme lubrificante
C₀, C_m – coeficientes adimensionais
Λ - parâmetro espessura específica do filme lubrificante
R_i - rugosidade média de cada superfície (Ra)
σ - rugosidade composta (RMS)
τ - tensões de corte
σ_{ref} - tensão de referência
k - elipicidade
C_σ e C_a - coeficientes
σ_{max} - máxima tensão compressiva
τ_{max} - tensão de corte máxima
z_s - profundidade
τ_{oct} - tensão de corte octaédrica máxima
τ_{xz}, τ_{yz} - tensões de corte ortogonais
τ₀ - tensão de corte ortogonal máxima
C_τ, C_{z0} - coeficientes
FT - frequência da gaiola
BS - frequência de rotação das esferas

Abreviaturas

PDM - manutenção preditiva
BCU - bearing condition units
BPI - pista interior
BPO - pista exterior
DR - ferrografia de leitura directa
DS – índice partículas mais pequenas
DL – índice partículas de desgaste grandes
CPUC - índice de concentração de partículas de desgaste
ISUC - índice de severidade do desgaste
PLP- percentagem de partículas grandes
PTC - pacific transducer corp

Índice de Figuras

Figura 1: Componentes de um rolamento [1].	7
Figura 2: Rolamentos Fixos de Uma Carreira de Esferas [11]	8
Figura 3: Rolamentos de Rolos Cilíndricos [11]	8
Figura 4: Rolamento de Carreira de Esferas de Contacto Angular [11]	8
Figura 5: Rolamentos de Duas Carreiras de Esferas de Contacto Angular [11]	9
Figura 6: Rolamentos de Esferas de Quatro Pontos de Contato [11]	9
Figura 7: Rolamento Autocompensadores de Esferas [11]	9
Figura 8: Rolamentos de Agulhas [11]	9
Figura 9: Rolamentos de Rolos Cónicos [11]	10
Figura 10: Rolamentos Axiais de Esferas de Escora Dupla [11]	10
Figura 11: Rolamentos Axiais Autocompensadores de Rolos [11]	10
Figura 12: Pressão e velocidade do fluido lubrificante no interior de um contacto EHD [3].	20
Figura 13: Espessura específica do filme lubrificante	25
Figura 14: Falha de lubrificante [24]	30
Figura 15: Fadiga superficial inicial em uma pista do anel externo de um rolamento ref.[SKF/2012]	32
Figura 16: Fadiga superficial inicial no anel externo de um rolamento autocompensador de rolos ref.[SKF/2012]	32
Figura 17: Aspecto das fissuras/picagem [25]	34
Figura 18: Evolução da avaria [25]	34
Figura 19: Desgaste abrasivo na pista do anel interno de um rolamento de rolos cilíndricos ref.[SKF/2012]	34
Figura 20: Abrasão a dois corpos [26]	35
Figura 21: Abrasão a três corpos [26]	35
Figura 22: Oxidação e desgaste em rotação [25]	35
Figura 23: Desgaste por erosão [26]	37
Figura 24: Desgaste adesivo na pista do anel interno de um rolamento de rolos cilíndricos ref.[SKF/2012]	37
Figura 25: Detioração da gaiola devido a gripagem [25]	38
Figura 26: Gripagem com incrustação das esferas [25]	38
Figura 27: Gripagem de um rolamento autocompensador de rolos incrustação de rolos e rutura de borda [25]	39
Figura 28: Marcas devido a montagem no eixo com apoio no anel externo [25]	41
Figura 29: Arrancamento de material na pista na pista de um anel externo [25]	41
Figura 30: Fissuras no centro da pista de rolamento [25]	42
Figura 31: Falso efeito brinell em um rolamento de esfera [25]	42
Figura 32: Crateras [25]	44
Figura 33: Estrias [25]	44
Figura 34: Corrosão de humidade no anel interno de um rolamento esféricos ref.[SKF/2012]	45
Figura 35: Corrosão de contato no diâmetro interno e na face de apoio [25]	46
Figura 36: Oxidação em funcionamento (entrada do liquido) [25]	47
Figura 37: Progressão de tamanho de partículas em desgaste normal [37]	57
Figura 38: Ferrografia de leitura directa [39]	58
Figura 39: Curva de tendência da evolução do desgaste [7]	59
Figura 40: Ferrografo Analítico [39]	59
Figura 41: Distribuição das partículas em função do tamanho no ferrograma [39]	60
Figura 42: Filtros vermelho e verde para análise e distinção da partículas de desgaste	61
Figura 43: Ferrografia de Leitura Directa (DR III)	65
Figura 44: microscópio bicromático-Olympus	68
Figura 45: Pagina principal da base de dados	70
Figura 46: Formulário (dados referentes a amostra e equipamentos)	71
Figura 47: Formulário 2 (exemplo de óleo Ester ISO VG 320)	72
Figura 48: Formulário 3 registo de características das partículas	72
Figura 49: Continuação do formulário 3	73
Figura 50: Relatório gerada pela base de dados	73
Figura 51: Gripagem em rolamentos axiais de rolos óleo Ester 320	74
Figura 52: Gripagem em rolamentos axiais de rolos (rodagem) óleo PAO 320	74
Figura 53: Pesquisa pelo tipo de óleo	75
Figura 54: Aspecto geral dos rolamentos cónicos de rolos.	78

Figura 55: Superfície de um rolo com forte deformação plástica (ampliações de 100x e 200x).....	79
Figura 56: Superfície de dois rolos com desgaste de corrosão electro-química (ampliação 200x).	79
Figura 57: Superfície de dois rolos com picagem por corrosão eléctrica (ampliação 200x)	79
Figura 58: Superfície da pista do rolamento (2) com corrosão e desgaste de fadiga (ampliação 200x). ..	80
Figura 59: Partículas de desgaste aderidas na superfície dos rolos (ampliações de 200x e 1000x).....	80
Figura 60: Presença de algumas partículas metálicas de pequenas dimensões (ampliação 200x).	82
Figura 61: Presença de partículas ferrosas de grandes e pequenas dimensões (200x e 1000x)	82
Figura 62: Presença excessiva de partículas ferrosas de grandes e pequenas dimensões e de óxidos térmicos (200x e 1000x)	83
Figura 63: Resultados da análise da Ferrografia analítica do rolamento principal das pás da turbina.....	85
Figura 64: Ampliação da microfotografia anterior	86
Figura 65: Microfotografias anterior apos tratamento térmico	87

Índice de Tabelas

Tabela 1: Comparação da lubrificação com massa e óleo [15].	15
Tabela 2: Morfologia das partículas	62
Tabela 3: Mudança de cor das partículas ferrosas após tratamento térmico[40]	64
Tabela 4: identificação da metalurgia das partículas de desgaste após tratamento térmico [41].....	65
Tabela 5: Rolamentos de esfera + referência.....	75
Tabela 6: Rolamentos de rolos + referência	76
Tabela 7: Característica do óleo Ester ISO VG 320	76
Tabela 8: Condições do ensaio	76
Tabela 9: Amostras efetuadas.....	84
Tabela 10: Índices de desgaste da amostra	85

Índice

Lista de Símbolos	xi
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
Índice	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura	3
2. Tipos de Rolamentos, Lubrificação e Mecânica do Contacto	7
2.1. Conceito Básico de Rolamento	7
2.1.1. Apresentação de Diferentes Tipos de Rolamentos	8
2.1.2. Classificação dos Rolamentos	11
2.2. Lubrificação	12
2.2.1. A Lubrificação nos Rolamentos	13
2.2.2. Métodos Utilizados na Lubrificação com Óleo.....	15
2.2.3. Seleção do Óleo Lubrificante	16
2.2.4. Aditivos	17
2.3. Mecânica do Contacto	19
2.3.1. Pressão no Contacto	20
2.3.2. Espessura do Filme Lubrificante	23
2.3.3. Tensões nos Sólidos	26
2.4 Conclusão.....	28
3. Desgaste e Análise de Avarias em Rolamentos	29
3.1. Introdução.....	29
3.2. Causas Típicas de Danos em Rolamentos	30
3.3. Sinais Externos de Deterioração.....	31
3.4. Possíveis Avarias nos Rolamentos	32
3.4.1. Fadiga Superficial	32
3.4.2. Desgaste Abrasivo	34
3.4.3. Desgaste Erosivo, Adesivo e Gripagem	36
3.4.4. Desgaste por, Cavitação, Deformação Plástica	39
3.4.5. Avarias Devido a Montagem	41
3.4.6. Vibrações.....	42

3.4.7. Avarias Provocadas por Correntes Eléctricas	43
3.4.8. Desgaste corrosivo	44
3.5. Análise de Avarias.....	48
3.5.1. Estratégias de Análise de Partículas de Desgaste	48
3.5.2 Tipos de Análises.....	49
3.5.2.1. Análises de Vibrações.....	49
3.5.2.2. Ultra-Sons.....	51
3.5.2.3. Termografia.....	51
3.5.2.4. Análise de Lubrificantes	52
3.6. Conclusão.....	53
4. Ferrografia	55
4.1. Introdução.....	55
4.1.1. Instrumentos e Técnicas de Ferrografia.....	55
4.1.2. Análise do Óleo Lubrificante	56
4.2. Ferrografia de Leitura Directa	57
4.3. Ferrografia Analítica (FM III)	59
4.4. Amostragem	62
4.5. Tratamento Térmico.....	64
4.6. Procedimentos experimentais.....	65
4.6.1. Ferrografia de Leitura Directa (DR III).....	65
4.6.2. Ferrografia Analítica.....	66
4.6.3. Microfotografia	68
4.7. Conclusão.....	69
5. Base de Dados	70
5.1 Criação de Base de Dados	70
5.2 Consultar a Base de Dados	74
5.3 Exemplo de Cálculo.....	75
5.4. Conclusão.....	77
6. Casos de Estudo	78
6.1 Caso de estudo – Análise de Rolamentos de um Trem de Secagem de Pasta de Papel	78
6.1.1. Análise de Partículas de Desgaste.....	81
6.1.2. Discussão	83
6.2. Segundo caso de estudo	84
6.2.1. Rolamento principal das pás da turbina de um aerogerador	84
6.2.2. Interpretação dos resultados.....	88
6.2.3. Considerações finais sobre os resultados.....	88
7. Conclusões.....	89

8. Bibliografia.....	90
8.1. Referências Bibliográficas.....	90
9. Anexos.....	93

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A maioria dos equipamentos dinâmicos, actualmente existentes, utiliza rolamentos [1]. Estes são os componentes da máquina que permitem o movimento relativo entre os componentes móveis e os estruturais dos equipamentos [1,2]. Por outro lado os rolamentos suportam os esforços gerados pelos componentes em movimento, transmitindo-os à estrutura. São constituídos por um anel fixo e outro rotativo, separados por elementos rolantes de modo a que seja possível o movimento livre do anel móvel. São utilizados com o objectivo de minimizar o atrito entre os componentes móveis e fixos. Deste modo, as perdas de energia por dissipação de calor são reduzidas e conseqüentemente, o rendimento energético dos equipamentos será aumentado. O contínuo desenvolvimento e aperfeiçoamento destes componentes têm permitido que os equipamentos rotativos funcionem cada vez com maiores velocidades e maior fiabilidade [1].

Logo os rolamentos tornam-se componentes fundamentais nas máquinas em que se encontram instalados, para que funcionam nas condições desejadas. Apesar dos rolamentos serem componentes mecânicos robustos e com uma vida útil prolongada, se não forem aplicados determinados procedimentos, a probabilidade de ocorrer uma degradação prematura aumenta significativamente. Para que um rolamento possa funcionar no tempo de vida esperado, é necessário que os procedimentos sejam correctos nas fases de armazenagem, manuseamento, montagem e lubrificação [1].

Os rolamentos são componentes de precisão e para preservar a sua exatidão e fiabilidade deve-se tomar cuidado no seu manuseio. Em particular, deve-se manter a limpeza dos rolamentos, evitar impactos e prevenir a oxidação [4].

As metas importantes a serem atingidas pelos rolamentos são uma longa durabilidade, uma elevada fiabilidade e economia. Para ser possível atingir esses objetivos é necessário ter em consideração todos os factores que afetam os rolamentos, não apenas a seleção do tipo de rolamento, mas também as partes contíguas como o veio, a caixa, as peças de fixação, a vedação e especialmente, o lubrificante [5].

A finalidade principal na utilização de um lubrificante é reduzir o atrito e o desgaste entre duas superfícies em contacto animadas de movimento relativo. Assim, pode-se dizer que, em

princípio, qualquer substância sólida, líquida ou gasosa interposta entre duas superfícies e que facilite o seu escorregamento é um potencial lubrificante. No entanto, requerem-se normalmente outras características para os lubrificantes, sendo as mais importantes separar bem as superfícies e evacuar o calor das superfícies em contacto [6].

Qualquer sistema mecânico lubrificado é acompanhado por um processo de desgaste progressivo dependente das condições de funcionamento a que é submetido, das condições ambientais, assim como de outros factores (erros de projecto, de montagem, má utilização, etc.). As partículas geradas nesse processo de desgaste vão sendo incorporadas no lubrificante e é através da análise desse lubrificante que se consegue acompanhar o aumento progressivo do desgaste da máquina, assim como, determinar o estado da condição do lubrificante. Assim, a partir dos resultados das análises de acompanhamento, é possível prever a ocorrência de possíveis avarias e evitá-las, como também determinar o momento correcto para a mudança do lubrificante [7].

Uma forma eficaz de análise dos lubrificantes é através da utilização das técnicas de ferrometria e ferrografia analítica que são técnicas de manutenção preditiva e que consistem na avaliação do desgaste do equipamento por meio da análise das partículas presentes no óleo lubrificante [8].

A análise de partículas de desgaste utilizando diversas técnicas e em particular por ferrometria e ferrografia são um meio eficaz para identificar e responder às necessidades de manutenção [9].

Um programa de análise de lubrificante bem implementado fornece uma informação preciosa para otimizar os recursos de manutenção e simultaneamente aumentar a fiabilidade do equipamento e do lubrificante [10].

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal proceder a caracterização de partículas de desgaste dos rolamentos por Ferrografia e Ferrometria.

Como corolário deste estudo, pretende-se:

- Identificar as partículas de desgaste em rolamentos;
- Reconhecer o tipo de avaria;
- Através dos dois pontos anteriores é possível identificar a causa da avaria.

Para a prossecução dos objetivos anteriormente referidos, tornar-se-á necessário:

- Saber identificar o rolamento em estudo;
- Reconhecer o funcionamento da lubrificação no rolamento;
- Estudar os procedimentos para uma correta recolha da amostra;
- Realizar análises de Ferrografia e Ferrometria;
- Analisar os resultados e identificar o tipo de desgaste presente no lubrificante;
- Caracterização das partículas de desgaste;
- Importar os resultados experimentais para uma base de dados;
- Proceder à elaboração do presente relatório.

1.3. Estrutura

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos e uma conclusão.

O capítulo 1 – Faz uma introdução e o enquadramento e apresenta os objetivos e a estrutura desta dissertação.

O capítulo 2 - Tipos de Rolamentos, Lubrificação e Mecânica do Contacto. Uma vez que o objetivo deste trabalho é a caracterização das partículas de desgaste em rolamentos, este capítulo será dedicado ao estudo dos rolamentos. Este estudo vai permitir conhecer melhor este componente que é indispensável nos equipamentos mecânicos. Iniciará com uma breve descrição sobre o que são os rolamentos e para que servem, de seguida é apresentada uma descrição dos tipos de rolamentos de acordo com alguns catálogos técnicos. Será apresentado

um estudo sobre a lubrificação dos rolamentos, a sua importância e algumas técnicas para lubrificar os rolamentos. Neste capítulo é apresentada também uma breve descrição sobre os aditivos, uma vez que estes são os responsáveis para melhorar as propriedades dos lubrificantes. De forma a completar o estudo sobre os rolamentos é apresentada a mecânica do contacto.

O capítulo 3 - Desgaste e Análise de Avarias em Rolamentos. Este capítulo é o complemento do capítulo 2 e o estudo recai sobre o desgaste e as avarias em rolamentos, apresentando diferentes tipos de avarias e os mecanismos para a controlar. Serão também apresentadas algumas técnicas de análise de avarias de uma forma genérica e diferentes formas de análise (análise de vibrações, ultra-sons, termografia e análise de lubrificantes). Além do estudo de desgaste em rolamentos a intenção deste capítulo é demonstrar que a Ferrografia não é a única técnica eficiente para análise de avarias.

O capítulo 4 – Ferrografia. É apresentada uma descrição detalhada das técnicas utilizadas na análise das partículas de desgaste em rolamentos, nomeadamente a Ferrografia de Leitura Direta e a, Ferrografia Analítica. A Ferrografia de Leitura Direta permite a monitorização de um dado sistema lubrificado através da análise de amostras do lubrificante, enquanto a Ferrografia Analítica permite saber informações adicionais sobre o desgaste presente numa amostra de lubrificante.

No capítulo 5 - Base de Dados. É descrita a base de dados, os formulários, algumas consultas e onde é apresentado, para um dos casos analisados, um exemplo de cálculo de pressões de contacto e espessura específica do filme lubrificante num rolamento.

No capítulo 6 – Casos de Estudo. São apresentados dois casos de estudo para consolidar a aplicação das técnicas utilizadas neste trabalho.

No capítulo 7 – Conclusões. São apresentadas as conclusões do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

ESTA PÁGINA FOI, INTENCIONALMENTE, DEIXADA EM BRANCO.

2. Tipos de Rolamentos, Lubrificação e Mecânica do Contacto

2.1. Conceito Básico de Rolamento

Neste capítulo serão apresentados vários tipos de rolamentos (incluindo a sua classificação), a importância da lubrificação nos mesmos, os aditivos que melhoram as propriedades dos lubrificantes e a mecânica do contacto.

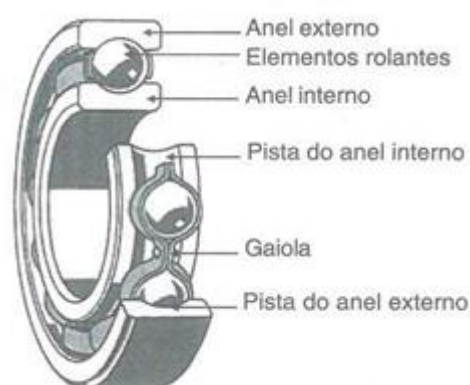


Figura 1: Componentes de um rolamento [1].

Os rolamentos são os componentes duma máquina que permitem o movimento relativo entre os componentes móveis e os estruturais dos equipamentos [1]. Os rolamentos são constituídos por um anel externo, um anel interno, os elementos rolantes e a gaiola (Figura 1).

O anel externo é o componente que normalmente está instalado no alojamento e se encontra estacionário. Em algumas aplicações o anel

externo pode ser giratório como por exemplo nas rodas dos veículos automóveis.

O anel interno é o componente rotativo, encontra-se montado no veio. Os elementos rolantes são os componentes que separam o anel externo do interno, permitindo o movimento relativo entre eles. Estes componentes podem ser esferas, rolos ou agulha.

A gaiola tem como finalidade manter o afastamento entre os elementos rolantes. Os rolamentos que não possuem gaiola têm a totalidade do espaço preenchido entre os anéis por elementos rolantes [1].

2.1.1. Apresentação de Diferentes Tipos de Rolamentos

Devido a grande variedade de rolamentos, em seguida são apresentados alguns dos mais utilizados [11].

Rolamentos Fixos de Uma Carreira de Esferas – Estes rolamentos são usados em várias aplicações, o canal da pista no anel interno e no anel externo apresentam um perfil em arco, com raio ligeiramente maior que o raio das esferas e permitem o apoio tanto da carga radial como da carga axial em ambos os sentidos (ver Figura 2).



Figura 2: Rolamentos Fixos de Uma Carreira de Esferas [11]

Nestes rolamentos o atrito é pequeno, razão que os leva a serem usados em aplicações que requerem baixo ruído e vibração. Também são usados em locais onde existe uma alta velocidade de rotação. Existem vários tipos, entre os quais podemos destacar, os do tipo aberto, os blindados com placas de aço, os vedados com proteção de borracha, e os com anel de retenção no anel externo. As gaiolas utilizadas são de aço [11].

Rolamentos de Rolos Cilíndricos - Rolamentos de construção simples em que os rolos de forma cilíndrica estão em contato linear com a pista ver Figura 3. Como o atrito entre os corpos rolantes e o rebordo do anel é



Figura 3: Rolamentos de Rolos Cilíndricos [11]

reduzido, são adequados para altas rotações. O anel interno e o anel externo são separáveis em todos os tipos. Os rolamentos de rolos cilíndricos que não têm o rebordo no anel interno ou no anel externo, por permitirem o movimento relativo entre o anel interno e o anel externo na direção axial, são utilizados como rolamentos lado livre. Os rolamentos de rolos cilíndricos que possuem rebordos nos dois lados de um dos anéis, interno ou externo, e um rebordo no outro anel, podem apoiar a carga axial de certo grau em um sentido.

Rolamentos de uma Carreira de Esferas de Contacto Angular - Os rolamentos deste tipo permitem o apoio da carga radial e num único sentido a carga axial. As esferas e os anéis, interno e externo, formam ângulos de contacto de 15°, 25°, 30° ou 40°. Quanto maior o ângulo de contacto maior será a capacidade de carga axial, e quanto menor o ângulo de contacto melhor será para altas rotações (Figura 4).



Figura 4: Rolamento de Carreira de Esferas de Contacto Angular [11]

Normalmente, duas peças do rolamento são contrapostas e utilizadas com o ajuste da folga. Geralmente, as gaiolas utilizadas são de aço, mas para os rolamentos de alta precisão com ângulo de contacto menor que 30° , são utilizadas principalmente, as gaiolas de poliamida.

Rolamentos de Duas Carreiras de Esferas de Contacto Angular-

Possuem a configuração básica de duas peças do rolamento de uma carreira de esferas de contacto angular dispostas costa a costa, em que os anéis internos e externos estão cada qual integrado numa única peça. Consequentemente têm a capacidade de apoiar a carga axial em ambos os sentidos (Figura 5).



Figura 5: Rolamentos de Duas Carreiras de Esferas de Contacto Angular [11]

Rolamentos de Esferas de Quatro Pontos de Contacto - Possuem o anel interno bipartido num plano perpendicular ao centro do eixo e são rolamentos de uma carreira de esferas de contacto angular com os anéis internos e externos separáveis (Figura 6). Permite apoiar a carga axial em ambos os sentidos com uma única peça. O ângulo de contacto formado pela esfera e os anéis interno e externo é de 35° . Com uma peça deste rolamento pode-se substituir a combinação face a face ou costa a costa do rolamento de esferas de contacto angular. Geralmente, as gaiolas utilizadas são de latão.



Figura 6: Rolamentos de Esferas de Quatro Pontos de Contacto [11]

Rolamento Autocompensadores de Esferas - O anel interno possui duas pistas e a pista do anel externo é esférica. O centro do raio que forma esta superfície esférica é coincidente ao centro do rolamento, consequentemente, o anel interno, as esferas e a gaiola inclinam-se livremente em relação ao anel externo (Figura 7). Os erros de alinhamento que ocorrem devido aos casos como o do desvio na maquinagem do veio e alojamento, e as deficiências na instalação são corrigidos automaticamente. Além disso, existem também os rolamentos de furo cónico que são fixados através de buchas.



Figura 7: Rolamento Autocompensadores de Esferas [11]

Rolamentos de Agulhas- Nos rolamentos de agulhas são inseridos um grande número de rolos finos e alongados (agulhas) com comprimento de 3 a 10 vezes o diâmetro Figura 8. Consequentemente, com a reduzida proporção do diâmetro externo em relação ao diâmetro do círculo inscrito dos rolos, possuem capacidade de carga radial comparativamente maior. Existem vários tipos de rolos agulha, como



Figura 8: Rolamentos de Agulhas [11]

os de anel externo estampado em chapa de aço especial, os sólidos de anéis maquinados, as gaiolas com os rolos e sem anéis, os rolos comando, etc. Além disso, existem tipos e classificações como: com anel interno e sem anel interno ou com gaiola e sem gaiola. Nos rolamentos com gaiola são usadas, principalmente, as gaiolas de aço.

Rolamentos de Rolos Cónicos- Os rolos cónicos trapezoidais inseridos como corpos rolantes são guiados pelo rebordo maior do anel interno. De grande capacidade de carga permitem o apoio da carga radial e num único sentido (Figura 9). Em geral, tal como no rolamento de esferas de contacto angular, duas peças do rolamento são usadas contrapostas. Neste caso, em função do ajuste do espaçamento entre os anéis internos ou entre os anéis externos na direção axial, é possível seleccionar a folga interna adequada. O anel interno e o anel externo podem ser instalados independentemente por serem separáveis. Conforme o ângulo de contacto estão classificados em: ângulo normal, ângulo intermediário e ângulo grande. Na classificação pelo número de carreiras, há também os rolamentos de duas e de quatro carreiras de rolos cónicos. Geralmente, as gaiolas utilizadas são de aço.



Figura 9: Rolamentos de Rolos Cónicos [11]

Rolamentos Axiais de Esferas de Escora Dupla - São constituídos por anéis em configuração de arruelas com canal e gaiolas com as esferas embutidas (Figura 10). O anel a ser instalado no eixo é denominado de anel interno e o anel a ser instalado no alojamento é denominado de anel externo. Nos rolamentos de escora dupla, o anel central (anel intermediário) é o instalado no eixo. Os rolamentos axiais de esferas de escora simples suportam a carga axial num sentido e os rolamentos de escora dupla suportam a carga axial em ambos os sentidos. No intuito de minimizar a influência de desvios na instalação, existem também os rolamentos axiais de esferas com contraplaca esférica no anel externo. Nos rolamentos pequenos são usadas, principalmente, as gaiolas de aço estampados e nos rolamentos grandes as gaiolas maquinadas.



Figura 10: Rolamentos Axiais de Esferas de Escora Dupla [11]

Rolamentos Axiais Autocompensadores de Rolos - Rolamentos axiais em que os rolos trapezoidais são dispostos obliquamente na superfície de rolagem (Figura 11). O rolamento possui auto-alinhamento em virtude da pista do anel externo ser esférica. A capacidade de carga axial é elevadíssima e quando estiver sob carga axial permite a aplicação de cargas radiais moderadas. As gaiolas utilizadas são de aço ou de latão.



Figura 11: Rolamentos Axiais Autocompensadores de Rolos [11]

2.1.2. Classificação dos Rolamentos

Os diversos tipos de rolamentos existentes podem ser classificados em função de dois factores. O primeiro é o tipo de elementos rolantes, sendo o segundo a direcção da carga para a qual se encontram adequados [1].

Em função da forma dos elementos rolantes, os rolamentos são classificados de: rolamentos de esferas, rolamentos de rolos e rolamentos de agulhas [1].

Rolamentos de esferas

- Rígidos de esferas;
- Autocompensadores;
- Contacto angular;
- Axiais.

Rolamentos de rolos

- Cilíndricos;
- Autocompensadores;
- Cónicos;
- Axiais.

Rolamentos de agulhas

- Radiais;
- Axiais.

Em relação a direcção da carga, os rolamentos são classificados em rolamentos radiais e axiais.

Rolamentos radiais

- Rígidos de esferas;
- Esfera contacto angular;
- Rolos cilindros;
- Rolos cónicos;
- Autocompensadores rolos;
- Autocompensadores esferas;
- Radiais agulhas.

Rolamentos axiais

- Axiais de esferas;
- Axiais de rolos;
- Axiais de agulhas.

2.2. Lubrificação

A maioria dos lubrificantes usados são os líquidos, dada a sua elevada fluidez (baixa tensão de corte), mas também são usados lubrificantes sólidos e massas lubrificantes (por vezes referidas como massas “consistentes”).

Quando existe escorregamento entre superfícies metálicas em contacto a lubrificação é fundamental para que não ocorra desgaste precoce. A principal consequência da utilização de um lubrificante é reduzir o atrito entre os corpos, o que diminui fortemente o calor gerado no contacto [3].

O uso de lubrificantes permite lubrificar, isto é, formar um filme de fluido entre as superfícies com movimento relativo, actua como refrigerante removendo neste caso o calor gerado na máquina, actua como um fluido hidráulico em certas aplicações, transporta e retira do contacto as partículas de desgaste e/ou contaminantes, evita o desgaste das superfícies onde a lubrificação é limite, evita a acumulação de depósitos no sistema lubrificante (lodos e vernizes), protege as superfícies metálicas contra a oxidação e corrosão, e evita a formação de espuma [7].

Os contactos não lubrificados dizem-se contactos secos. Nestes contactos as forças são directamente transmitidas entre as superfícies dos sólidos e o atrito é muito elevado. Limitam-se a aplicações em que as solicitações são suaves ou moderadas, nomeadamente quando a pressão de contacto e a velocidade são baixas. Nos contactos lubrificados admite-se existir pelo menos algum lubrificante entre as superfícies, mesmo que este não consiga formar uma película contínua. Dizem-se contactos com lubrificação mista aqueles em que são esporádicos os contactos entre as superfícies metálicas, e com lubrificação limite aqueles em que o contacto entre os metais é frequente [3].

Todos os lubrificantes são constituídos por um óleo de base e podem ser divididos em três tipos de lubrificantes: minerais, sintéticos e vegetais [13].

Óleos minerais são obtidos da destilação do petróleo bruto e são normalmente distinguidos pela sua composição química, podendo ser parafínicos, nafténicos e aromáticos. A fracção aromática é indesejável e encontra-se em pequenas proporções, logo são os menos utilizados na lubrificação, já os de base parafínicos e nafténicos são largamente usados devido ao baixo custo e razoável performance [12].

Óleos parafínicos têm uma longa estrutura, de cadeia linear, os óleos nafténicos possuem uma estrutura em anel saturada e são mais comuns em aplicações de temperatura moderada. Os óleos aromáticos têm uma estrutura de anel não-saturada e são usados para a fabricação de compostos de vedação e adesivos. Os óleos de base minerais parafínicos e nafténicos apresentam algumas vantagens que serão descritos de seguida. Em geral, os óleos parafínicos têm uma viscosidade mais estável em resposta às mudanças de temperatura (alto índice de viscosidade, VI). Óleos parafínicos também têm uma excelente estabilidade à oxidação sendo relativamente pouco reativos. Por outro lado, os óleos nafténicos têm melhor desempenho em baixas temperaturas e baixo ponto de fluidez. Um lubrificante formulado pode ser uma mistura de óleos parafínicos e nafténicos para alcançar o equilíbrio desejado de propriedades no produto final.

Os óleos sintéticos são fluidos sintéticos que têm estruturas encadeadas idênticas, sendo bastante uniformes. Uma das vantagens de um óleo sintético é que o tamanho molecular e peso são constantes enquanto óleos minerais variam muito, portanto, as suas propriedades são muito previsíveis [13].

Os lubrificantes sintéticos são obtidos por síntese de hidrocarbonetos leves com inclusão de alguns elementos orgânicos não petrolíferos. Estes lubrificantes apresentam alguns benefícios, como o aumento da longevidade do óleo e melhor resistência térmica, no entanto, tem um custo mais elevado. Os óleos sintéticos compreendem fundamentalmente quatro tipos: os hidrocarbonetos sintéticos, os poliglicóis, os ésteres orgânicos e os ésteres fosfatados.

Óleos vegetais e animais - historicamente, pode-se dizer que foram os primeiros fluidos utilizados pelo homem como lubrificantes. Foram sendo gradualmente substituídos à medida que outros tipos de lubrificantes foram sendo descobertos, os quais apresentavam melhor desempenho [12].

2.2.1. A Lubrificação nos Rolamentos

Se os rolamentos devem operar de maneira confiável, eles deverão estar adequadamente lubrificadas para evitar o contato direto de metal com metal entre os corpos rolantes, pistas e gaiolas. O lubrificante também inibe o desgaste e protege as superfícies do rolamento contra corrosão. A escolha de um lubrificante adequado e do método de lubrificação para cada aplicação de rolamentos é, portanto, importante para uma correta manutenção. Uma ampla

gama de massas e óleos estão disponíveis para a lubrificação de rolamentos e existem também lubrificantes sólidos, por exemplo, para condições de temperaturas extremas.

A escolha de um lubrificante depende principalmente das condições de funcionamento, ou seja, da faixa de temperatura e de velocidade, bem como da influência do meio ambiente. As temperaturas de funcionamento mais favoráveis serão obtidas quando a quantidade mínima de lubrificante necessária para uma lubrificação confiável do rolamento for fornecida. No entanto, quando o lubrificante tem funções adicionais, como vedação ou dissipação do calor, podem ser exigidas quantidades adicionais de lubrificante. O lubrificante num conjunto de rolamentos perde gradualmente as suas propriedades de lubrificação como resultado do trabalho mecânico, envelhecimento e acumulação de contaminantes. Portanto, é necessário que a massa seja recarregada ou renovada e que o óleo seja filtrado e trocado em intervalos regulares [14].

Um dos propósitos da lubrificação dos rolamentos é prevenir o contacto metálico direto entre os corpos rolantes e as pistas. Isto consegue-se através da formação de uma película fina de óleo ou massa sobre as superfícies de contacto. A lubrificação dos rolamentos tem as seguintes vantagens/funções:

- redução do atrito e do desgaste;
- dissipação do calor por atrito;
- vida do rolamento prolongada;
- prevenção contra a oxidação;
- proteção contra elementos nocivos.

Para alcançar os efeitos mencionados acima, deve ser selecionado o método de lubrificação mais eficiente para as condições de funcionamento. Outro factor importante a ter em conta, é o tipo efetivo de estrutura vedante que previne a invasão de elementos nocivos (pó, água, etc) para o interior do rolamento, que impeça a passagem de poeira e outras impurezas para lubrificante, e que previna a fuga do mesmo.

Existem dois métodos básicos de lubrificação: lubrificação com óleo e lubrificação com massa. Para saber qual escolher deve-se ter em consideração as condições de funcionamento.

A tabela 1 apresenta as características de lubrificação com massa e com óleo. E pode-se verificar que a lubrificação com óleo é conveniente em aplicações onde se requer que o calor

gerado pelo rolamento, ou o calor proveniente de outras fontes aplicado sobre o rolamento, seja extraído do mesmo e dissipado para fora [15].

Tabela 1: Comparação da lubrificação com massa e óleo [15].

Características	Lubrificação com massa	Lubrificação com óleo
Manutenção	Muito Bom	Razoável
Confiabilidade	Bom	Muito Bom
Efeito de refrigerante	Mau	Bom
Capacidade de retenção	Bom	Mau
Degradação	Bom	Bom
Contaminação do meio ambiente	Bom	Mau
Elevada rotação	Mau	Bom

Quase todos os rolamentos utilizam o método de lubrificação por massa ou por óleo, mas em algumas aplicações especiais podem ser utilizados lubrificantes sólidos, como o bissulfeto de molibdénio ou grafite.

2.2.2. Métodos Utilizados na Lubrificação com Óleo

De seguida são apresentados os vários métodos para lubrificação dos rolamentos [15].

A lubrificação por banho de óleo - é o método mais utilizado e emprega-se em aplicações com baixas velocidades de rotação. Em aplicações com eixos horizontais, o nível de óleo deverá ser mantido aproximadamente no centro do corpo rolante mais baixo, quando o rolamento está em repouso. Em eixos verticais com baixas rotações, o nível de óleo deverá manter entre 50% e 80 % dos corpos rolantes submersos.

Lubrificação por pulverização de óleo - neste método, um impulsionador ou dispositivo semelhante montado sobre o eixo recolhe o óleo e pulveriza sobre o rolamento. Este método pode ser utilizado em rotações consideravelmente altas.

Lubrificação por circulação - utilizado em aplicações para o arrefecimento de rolamentos ou para sistemas automáticos de lubrificação. Uma das vantagens deste método é que os dispositivos de arrefecimento e filtros, para manter a pureza do óleo, podem ser instalados dentro do sistema. Para que o óleo lubrifique perfeitamente o rolamento, as entradas e saídas devem ser instalados em lados opostos do rolamento.

Lubrificação por disco - neste método, um disco parcialmente submerso roda a alta rotação, impulsionando o óleo para cima, para dentro de um reservatório de onde em seguida é drenado para baixo através do rolamento lubrificando-o.

Lubrificação por nuvem de óleo - utilizando ar comprimido, o óleo de lubrificação é atomizada antes de passar através do rolamento. Em função da baixa resistência do lubrificante, este método é apropriado para aplicações com altas rotações.

Lubrificação ar-óleo - neste método, a quantidade mínima requerida de lubrificação é medida e os rolamentos são alimentados individualmente em intervalos ideais de tempo utilizando-se ar-comprimido. Com o constante envio de óleo fresco ao rolamento, e pelo efeito de arrefecimento do ar-comprimido, o aumento de temperatura do rolamento pode ser mantido no mínimo.

Lubrificação por jato de óleo - Este método lubrifica o rolamento por meio da injeção sob pressão do óleo lubrificante diretamente dentro do rolamento. Este é um sistema confiável para altas rotações e altas temperaturas. Utilizado para a lubrificação de rolamentos de motores a jato e turbinas a gás e outros equipamentos de altas rotações. A lubrificação da pista inferior de máquinas ferramenta é um exemplo de aplicação deste método de lubrificação.

2.2.3. Seleção do Óleo Lubrificante

Em condições normais de operação, os óleos para fusos, óleos para máquinas, óleos para turbina, e outros óleos minerais são largamente utilizados na lubrificação de rolamentos. Entretanto, para temperaturas acima de 150 °C ou abaixo de -30 °C, são empregues óleos sintéticos tais como óleo diester, óleo de silicone, e óleo de fluorcarbono. Para óleos lubrificantes, a viscosidade é uma das propriedades mais importantes e que determina a eficiência de um óleo. Se a viscosidade é muito baixa, a formação de um filme de óleo será insuficiente, e poderão ocorrer danos nas pistas do rolamento. Se a viscosidade é muito alta, a resistência viscosa também será alta e resultará num aumento de temperatura e perdas por atrito. Em geral, em aplicações com altas rotações devem ser usados óleos com baixa viscosidade; em aplicações com cargas pesadas devem-se usar óleos com alta viscosidade [15].

2.2.4. Aditivos

A vida do rolamento fica mais curta se a espessura da película do lubrificante não for suficiente para evitar o contato de metal com metal nas superfícies de contato. Uma opção para superar isso é utilizar os chamados aditivos EP (extrema pressão). Altas temperaturas, induzidas pelo contato das superfícies nos locais onde as rugosidades são elevadas, ativam esses aditivos que previnem o desgaste e favorecem um aumento da vida útil do rolamento [14].

Muitos aditivos EP modernos são do tipo sulfuroso/fosforoso. Infelizmente, esses aditivos podem ter um efeito negativo na resistência da matriz de aço do rolamento. Se a temperatura de funcionamento e as tensões de contacto forem muito altas, os aditivos podem-se tornar quimicamente reativos mesmo sem o contacto entre as superfícies metálicas. Isso pode provocar corrosão/difusão nos contactos e levar a falhas prematuras no rolamento, geralmente iniciadas por microcorrosão. Portanto, recomenda-se o uso de aditivos EP menos reativos em temperaturas de funcionamento acima de 80 °C. Lubrificantes com aditivos EP não devem ser usados em rolamentos que operam a temperaturas superiores a 100 °C [14].

Os aditivos AW (antidesgaste) têm uma função semelhante à dos aditivos EP, ou seja, evitar contacto direto de metal com metal, o que torna difícil diferenciar uma da outra, no entanto, a forma como eles funcionam é diferente. A principal diferença é que um aditivo AW cria uma camada de proteção que adere à superfície. Deve-se tomar muito cuidado porque, os aditivos AW podem conter elementos que, da mesma forma que os aditivos EP, podem migrar para o aço e enfraquecer a estrutura. Determinados espessantes (por exemplo, complexo de sulfonato de cálcio) também proporcionam um efeito EP/AW sem atividade química e resulta no aumento da vida do rolamento. Se a espessura da película do lubrificante for suficiente, geralmente não se recomenda o uso de aditivos EP e AW. No entanto, existem circunstâncias nas quais os aditivos EP/AW podem ser úteis. Se ocorrer um escorregamento excessivo entre os rolos e as pistas de um rolamento, eles poderão ser benéficos [14].

Todos os óleos lubrificantes industriais possuem aditivos. Estes aditivos melhoram as propriedades do óleo base e controlam certos fenómenos como a estabilidade química ou a viscosidade do lubrificante. Os aditivos podem degradar-se com o tempo e muitos deles produzem resíduos indesejáveis quando queimados ou oxidados. Por isso também se usam aditivos cuja finalidade é apenas eliminar os resíduos deixados por outros aditivos [3]

Segundo Jeffers, K. [16], os aditivos podem ser utilizados para maximizar as boas propriedades do óleo base e minimizar as suas propriedades indesejáveis.

Os óleos lubrificantes base têm inerentemente boas propriedades, contudo pode ser necessário melhorar algumas características de modo a enfrentar os desafios da aplicação. Além disso, os óleos de base podem ter algumas propriedades indesejáveis que devem ser suprimidas. Uma grande variedade de compostos químicos é utilizada como aditivos e podem normalmente ser classificadas como [16]:

- **Antioxidantes (inibidores da oxidação)** - Promovem longa vida de serviço e armazenamento;
- **Aditivos antidesgaste** - Reduzem o atrito e o desgaste excessivo, quando não se forma uma película completa de fluido lubrificante;
- **Aditivos anti-espuma** - Dividem grandes bolhas de superfície e reduzem o número de pequenas bolhas de ar arrastadas no óleo;
- **Aditivos extremaPressão (EP)** - Previnem a gripagem/desgaste severo entre superfícies metálicas com escorregamento sob condições extremas de pressão (e temperatura);
- **Depressores do ponto de fluidez** - Permitem que o lubrificante escoe a temperaturas mais baixas;
- **Inibidores de Corrosão** - Protegem as superfícies metálicas contra o ataque químico induzido pela introdução da água e/ou outros contaminantes;
- **Melhorador do índice de viscosidade (VI)** - Reduzem a taxa de variação da viscosidade dos lubrificantes com a temperatura;
- **Detergentes** - Controlam a formação de depósitos;
- **Dispersantes** - Criam uma suspensão coloidal de partículas para impedir a formação de lamas, vernizes e depósitos;
- **Melhoradores de alcalinidade** - Neutralizam produtos ácidos da combustão.

Os Aditivos podem incorporar na composição de um óleo lubrificante entre menos de 1% até mais de 25%.

2.3. Mecânica do Contacto

Uma forma de reduzir o atrito entre peças mecânicas em movimento relativo, é sem dúvida a lubrificação. Como exemplo típico, refira-se o caso do óleo utilizado para lubrificar os apoios da cambota de um motor de combustão interna. A geometria dos apoios e o movimento relativo entre as peças em contacto, possibilitam a formação de um filme lubrificante que separa os veios dos seus apoios. Se a espessura do filme for suficiente para separar completamente as duas superfícies, então as forças de atrito serão apenas devidas às tensões de corte no filme lubrificante [17].

Este tipo de lubrificação, caracterizado pelo facto do filme lubrificante ser gerado pela cinemática e pela geometria das superfícies em contacto, é designado de lubrificação hidrodinâmica [17].

No entanto, no caso dos contactos concentrados, como os que se podem encontrar entre os rolos e as pistas de um rolamento, ou entre os dentes de uma engrenagem, a lubrificação puramente hidrodinâmica deixa de ser possível. Com efeito, estes tipos de componentes mecânicos são caracterizados pela elevada capacidade de carga, a qual se traduz em pressões de contacto e temperaturas de funcionamento extremamente elevadas. Tipicamente as pressões de contacto podem variar entre 0.5 e 3.0 GPa, e a temperatura de funcionamento entre 50 e os 200°C [17].

Verifica-se assim, que as elevadas variações de pressão e temperatura a que podem estar submetidas, quer as superfícies em contacto quer o filme lubrificante que as separa, sofrem deformações elásticas e as propriedades físicas do lubrificante são significativamente alteradas, nomeadamente da sua viscosidade e densidade [17].

A lubrificação deste tipo de contacto é usualmente designada de elastohidrodinâmica (EHD) diferindo da teoria de hidrodinâmica convencional em dois aspectos fundamentais, o filme lubrificante na teoria EHD, é dependente da deformação elástica dos sólidos em contacto e a viscosidade do lubrificante é dependente das pressões e temperaturas de contacto [17].

2.3.1. Pressão no Contacto

No caso em que as superfícies de contacto são pequenas e as pressões são muito grandes, as pressões desenvolvidas no fluido são de tal modo importantes que podem conduzir a deformações dos maciços de amplitude tal que não podem ser desprezadas, face à espessura média do filme em separação. Se os sólidos são elásticos o contacto é dito hertziano e o regime de lubrificação elastohidrodinâmico. É o caso das engrenagens, rolamentos e as cames. Nos contactos elastohidrodinâmicos, a capacidade de lubrificação é geralmente avaliada pela espessura média do filme que separa as rugosidades entre as duas superfícies. Um bom desempenho do lubrificante é normalmente conseguido quando essa espessura média é igual a pelo menos três vezes ao valor composto da rugosidade das superfícies [18].

Os regimes elastohidrodinâmicos (EHD) estabelecem-se quando a alta pressão de contacto provoca uma deformação elástica considerável das superfícies metálicas. Estes regimes são muito comuns em rolamentos, engrenagens, chumaceiras e outros contactos mecânicos onde se transmitem esforços elevados. Nos contactos EHD a aspiração do lubrificante para o interior do contacto também depende do arrasto das superfícies em movimento. A pressão de contacto assume o aspecto de uma parábola, com um máximo no centro do contacto, mas gera-se um pico de pressão imediatamente antes da saída (divergente). É nesse ponto que a pressão atinge o seu máximo e é aí que a espessura do filme lubrificante é mínima Figura 12.

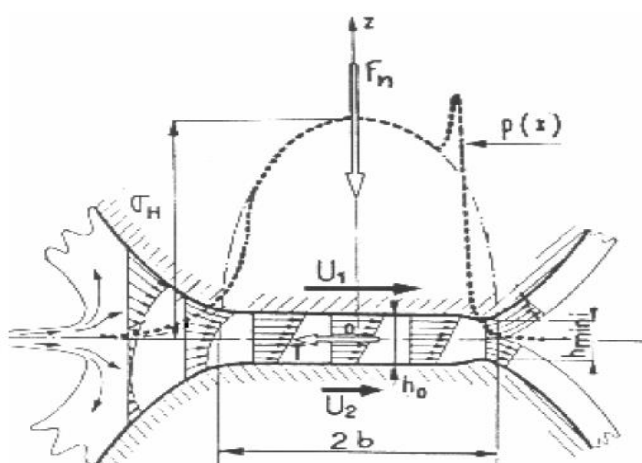


Figura 12: Pressão e velocidade do fluido lubrificante no interior de um contacto EHD [3].

A viscosidade do óleo tende a aumentar muito no interior do contacto, devido à pressão, e pode atingir uma rigidez muito superior à das superfícies em aço. Pelo contrário, o aumento

súbito da temperatura tende a fazer baixar rapidamente a sua viscosidade. Assim, é difícil projectar a lubrificação correcta de um contacto EHD sobretudo porque esta depende das condições no contacto mas também da reologia de cada lubrificante, o qual é sujeito a solicitações violentas em algumas fracções de segundo (durante o tempo que dura o contacto). Usualmente usam-se óleos viscosos, com alto índice de viscosidade e grande capacidade de formação de película, quase sempre aditivados com produtos que evitam a gripagem e o desgaste quando há contacto direto entre as superfícies. O modo predominante de desgaste em contactos EHD é a fadiga de contacto, uma vez que são elevadas as tensões impostas aos sólidos e quase nunca há contacto directo entre as superfícies metálicas. Os momentos de paragem e arranque são críticos porque permitem o desgaste por abrasão das superfícies enquanto a velocidade não é suficiente para a formação do filme de lubrificante [3].

Segundo Ferreira, L. A. [18], Para estudar um contacto elastohidrodinâmico torna-se necessário conhecer:

- As tensões de contacto das superfícies;
- As deformações elásticas;
- O comportamento reológico do lubrificante (não-newtoniano) e o conhecimento da variação da sua viscosidade com a pressão e temperatura;
- Comportamento térmico das superfícies.

A análise das tensões de contacto baseia-se na análise de Hertz que desenvolveu vários aspectos relativos ao cálculo de tensões e deformações de sólidos de contacto.

A análise de Hertz baseia-se nas seguintes hipóteses:

- O material de ambos os volumes em contacto é homogéneo, isotrópico e elástico (não necessitam de ser iguais);
- A carga aplicada é normal à superfície de contacto;
- As dimensões da área de contacto são muito pequenas relativamente aos raios de curvatura e às dimensões globais dos corpos em contacto.

Nos rolamentos os contactos ocorrem no regime elastohidrodinâmico, neste caso a pressão de contacto é extremamente elevada nas superfícies em contacto [3,18]. De seguida serão apresentadas passo a passo como é que se calcula a pressão de contacto e a espessura do filme lubrificante tanto nos contactos lineares (rolamentos de rolos planos) como nos contacto elípticos (rolamentos de esfera e outros) segundo a teoria de Hertz [3].

Começa-se por calcular o módulo de Young equivalente (E^*) e esta é calculada usando o coeficiente de Poisson de cada material (ν_i)

$$\frac{1}{E^*} = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (2.1)$$

Quando o contacto é do tipo linear com um comprimento (l) e a direcção do rolamento coincide com o eixo X calcula-se o raio equivalente no sentido do rolamento (R_x) para saber a semi-largura do contacto (a).

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}} \right) \quad (2.2)$$

$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot F_n \cdot R_x}{\pi \cdot l \cdot E^*}} \quad (2.3)$$

A pressão de contacto máxima (p_0) e média (p_m) são dadas por:

$$p_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot F_n \cdot R_x}{\pi \cdot l \cdot E^*}} \quad (2.4)$$

$$p_0 = a \frac{E^*}{R_x} = \frac{4}{\pi} p_m \quad (2.5)$$

Se o contacto for elíptico é necessário calcular as curvaturas equivalentes a partir dos raios de curvatura de cada superfície (R_x , R_y):

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}} \right) \quad (2.6)$$

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{y1}} + \frac{1}{R_{y2}} \right) \quad (2.7)$$

A razão de curvaturas R_c é por definição igual ou superior a 1 (é dada por A/B ou por B/A , conforme o caso) e usa-se para consulta dos ábacos. Com os valores tabelados de C_a e k (ver Anexo 1), e sabendo a força normal aplicada (F_n), determinam-se (a) e (b).

$$a = \sqrt{\frac{2F_n R_x}{\pi l E^*}} \quad (2.8)$$

$$b = \frac{a}{k} \quad (2.9)$$

Assim, a pressão máxima de Hertz (p_0) e a pressão média no contacto (p_m) são:

$$p_0 = \frac{3f_n}{2\pi ab} \quad (2.10)$$

$$p_m = \frac{F_n}{\pi ab} \quad (2.11)$$

O cálculo destas pressões mostra que é muito fácil atingir pressões de Hertz da ordem dos GPa, o que confirma uma situação de lubrificação EHD, se tivermos em conta a baixa rugosidade dos rolos ou esferas com as pistas dos rolamentos.

2.3.2. Espessura do Filme Lubrificante

A espessura do filme lubrificante pode ser facilmente estimada no centro (h_0) e no divergente (h_m) dos contactos EHD supondo que a temperatura do lubrificante (T_0) é constante ao longo do contacto Hertziano e que ocorre um regime de filme completo. É necessário conhecer a viscosidade dinâmica do lubrificante à pressão atmosférica e à temperatura de referência (η_0), o seu coeficiente de piezoviscosidade (α), as velocidades lineares das superfícies em contacto (U_1 e U_2) e a força normal aplicada (F_n). O cálculo dos raios equivalentes das superfícies (R_x e R_y) e do módulo de Young equivalente (E^*) é idêntico ao descrito anteriormente. Calculam-se três parâmetros (U , G , W) e dois factores geométricos (C_0 e C_m):

Parâmetro velocidade:

$$U = \frac{\eta_0(U_1 + U_2)}{2R_x E^*} \quad (2.12)$$

Parâmetro material:

$$G = 2. \alpha. E^* \quad (2.13)$$

Parâmetro carga:

- Contacto elíptico

$$W = \frac{2F_n}{R_x^2 E^*} \quad (2.14)$$

- Contacto Linear

$$W = \frac{2F_n}{R_x L E^*} \quad (2.15)$$

Para calcular a espessura do filme lubrificante no centro de um contacto linear (h_0) e a espessura mínima do filme lubrificante no divergente (h_m) considera-se que a direcção do rolamento é OX [3].

$$h_0 = 0.975. R_x. U^{0.727}. G^{0.727}. W^{-0.091} \quad (2.16)$$

$$h_m = 1.325. R_x. U^{0.7}. G^{0.54}. W^{-0.13} \quad (2.17)$$

No caso de um contacto elíptico é necessário determinar os coeficientes C_0 e C_m :

$$C_0 = 1 - 0.61. EXP \left[-0.752 \left(\frac{R_y}{R_x} \right)^{0.64} \right] \quad (2.18)$$

$$C_m = 1 - EXP \left[-0.7 \left(\frac{R_y}{R_x} \right)^{0.64} \right] \quad (2.19)$$

E o valor da espessura do filme lubrificante no centro (h_0) e no divergente (h_m) são dados por:

$$h_0 = 1.345. R_x. C_0. U^{0.670}. G^{0.530}. W^{-0.067} \quad (2.20)$$

$$h_m = 1.815 \cdot R_x \cdot C_m \cdot U^{0.68} \cdot G^{0.49} \cdot W^{-0.073} \quad (2.21)$$

O coeficiente de atrito entre peças de aço num contacto lubrificado pode ser mil vezes mais baixo que no mesmo contacto sem lubrificação. Para que isto suceda é necessário que o lubrificante separe completamente as superfícies em contacto, ou seja, que forme uma película contínua de espessura razoavelmente maior do que a altura das rugosidades superficiais (diz-se um filme completo). O parâmetro espessura específica do filme lubrificante supõe a existência de uma película permanente de lubrificante e relaciona a espessura dessa película com a altura média das rugosidades das superfícies Figura 13 [3].

$$\sigma = (R_1^2 + R_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

$$\Lambda = \frac{h_0}{\sigma} \quad (2.23)$$

Em que:

R_i = Rugosidade média de cada superfície (Ra) [μm]

σ = Rugosidade composta (RMS) [μm]:

h_0 = Espessura do filme lubrificante no centro do contacto [μm]

Λ = Espessura específica de filme []

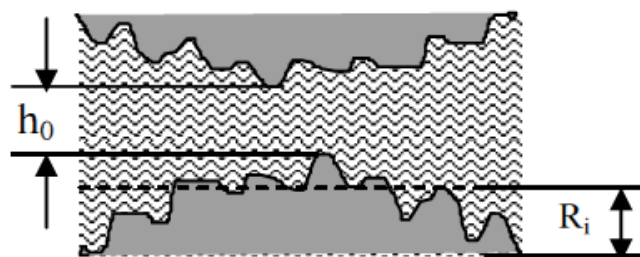


Figura 13: Espessura específica do filme lubrificante

Sempre que a altura média das rugosidades das superfícies é superior ou semelhante à espessura média do filme lubrificante no centro do contacto diz-se tratar-se de lubrificação limite ($\Lambda \leq 1$), nestas situações o contacto entre os metais é quase total ou muito frequente, sendo elevado o atrito entre os corpos. No regime misto ($1 < \Lambda < 3$), o contacto entre os metais ocorre nos pontos mais ásperos, existe lubrificantes mais não suficientes para separar completamente as superfícies. Quando a espessura de filme lubrificante é claramente superior à altura das rugosidades, isto é, ($\Lambda \geq 3$) o regime é de lubrificação total ou completa, e as condições são ideais para os regimes hidrodinâmicos. No entanto, o aumento da espessura de filme para valores superiores não diminui o atrito [3].

2.3.3. Tensões nos Sólidos

Conhecer a distribuição da pressão superficial é importante para a selecção de materiais para um dado contacto. No entanto, é também necessário saber o valor das tensões internas instaladas nos materiais por acção do contacto, sobretudo porque estas são dominantes nos processos de fadiga que levam à avaria dos componentes. As tensões internas dependem da pressão de contacto mas também do movimento relativo entre os sólidos e das propriedades das superfícies. As tensões normais são compressivas e atingem o valor máximo no centro do contacto, ao longo do eixo Z no ponto (0;0;0). Enquanto as tensões normais (σ) atingem valores máximos à superfície, as tensões de corte (τ) atingem valores máximos a determinada profundidade. Conhecendo o menor semi-eixo da elipse de contacto (a) calcula-se a tensão de referência (σ_{ref}) e, com ela, a pressão máxima no centro do contacto (P_0), que coincide com a máxima tensão compressiva ($\sigma_{max} \equiv \sigma_z$):

$$\sigma_{ref} = a(A + B)E^* \quad (2.24)$$

$$\sigma_{max} = c_\sigma \sigma_{ref} = p_0 \quad (2.25)$$

A variável elipticidade (k) relaciona os coeficientes C_σ e C_a :

$$c_\sigma = c_\sigma \frac{3k}{2\pi C_a^3} \quad (2.26)$$

A tensão de corte máxima (τ_{max}), num contacto linear o seu valor máximo e a profundidade a que actua (Z_s) podem ser calculados sabendo P_0 e a :

$$\tau_{max} = 0.3p_0 \quad (2.27)$$

$$Z_s = 0.786a \quad (2.28)$$

Considerando o critério de Von-Mises, a tensão de corte octaédrica máxima, que também actua à profundidade Z_s , é dada por:

$$\tau_{\text{oct}} = 0.272p_0 \quad (2.29)$$

As tensões de corte ortogonais τ_{xz} e τ_{yz} desenvolvem-se em planos perpendiculares ao eixo Z e são máximas a uma profundidade Z_0 . Nos contactos lineares os valores máximos destas tensões são dados por:

$$\tau_{xz}^{\text{max}} = \tau_o = 0.25p_0 \quad (2.30)$$

$$Z_0 = 0.42a \quad (2.31)$$

Num contacto elíptico a tensão de corte máxima (τ_{max}) e a profundidade a que actua (Z_s) podem ser calculadas recorrendo a valores tabelados de C_τ e (ver Anexo 1):

$$\tau_{\text{max}} = C_\tau \sigma_{\text{ref}} \quad (2.32)$$

$$Z_s = C_{zs} a \quad (2.33)$$

A determinação da tensão de corte octaédrica é feita através do coeficiente C_G valor tabelado (ver Anexo 1):

$$\tau_{\text{oct}} = C_G \sigma_{\text{ref}} \quad (2.34)$$

A tensão de corte ortogonal máxima e a profundidade a que actua são calculadas usando os coeficientes C_τ e C_{z0} tabelados em função de a/b (se a não coincidir com a direcção de rolamento usa-se b/a para consulta do ábaco e b nas expressões seguintes:

$$\tau_o = C_{\tau 0} a (A + B) E^* / 2 \quad (2.35)$$

$$Z_s = C_{z0} a \quad (2.36)$$

É importante saber a profundidade onde ocorrem as tensões máximas, pois a fadiga inicia-se aí, e pode ser comprovado quer com cálculos quer com observação de desgaste/avaria.

2.4 Conclusão

O capítulo 2 foi dedicado ao estudo dos rolamentos. Analisando este capítulo conclui-se que os rolamentos são indispensáveis nos equipamentos mecânicos, visto que, permitem o movimento relativo entre os componentes móveis e os estruturais dos equipamentos e assim minimizar o atrito entre os componentes.

Os rolamentos são constituídos por um anel externo, um anel interno, elementos rolantes e a gaiola. Hoje em dia encontram-se disponíveis no mercado diversos tipos de rolamentos e cada um possui características únicas que os torna particularmente adequados a determinadas aplicações.

Este estudo permite concluir também que a lubrificação é fundamental num rolamento para que não ocorra o desgaste precoce, impedindo o contato metal com metal (entre os corpos rolantes, pistas e gaiolas).

Neste capítulo verificou-se que os rolamentos são componentes mecânicos que operam no regime elastohidrodinâmico, que é típico dos contatos mecânicos onde se transmitem esforços elevados.

Nos contactos elastohidrodinâmicos, a capacidade de lubrificação é geralmente avaliada pela espessura média do filme que separa as rugosidades entre as duas superfícies, isto é, o lubrificante tem que ter uma espessura média igual a pelo menos três vezes ao valor composto da rugosidade das superfícies.

Ainda de acordo com este capítulo pode-se concluir também que os aditivos são extremamente importante porque melhoram as propriedades dos lubrificantes e protege as superfícies contra a corrosão e a oxidação.

3. Desgaste e Análise de Avarias em Rolamentos

3.1. Introdução

Os rolamentos estão entre os componentes mais importantes da grande maioria das máquinas sendo que as suas especificações de tempo de vida útil e de capacidade de carga muito rigorosas. Isto permite que em alguns casos se faça coincidir o tempo de vida do rolamento com o tempo de vida da máquina [19].

As causas mais comuns de avarias em rolamentos são: seleção incorreta, sobrecarga, defeito de fabricação, desalinhamento, montagem incorreta, lubrificação inadequada ou excessiva ou insuficiente, falha de vedação e descargas elétricas. Geralmente, os defeitos em rolamentos evoluem com certa lentidão e emitem sinais com bastante antecedência da falha final, que pode ocorrer por paragem ou quebra dos componentes. Defeitos típicos que evoluem dessa forma são: riscos nas pistas, ou esferas, “pitting”, fissuras, corrosão, erosão e contaminação. O processo de degradação de um rolamento pode iniciar na pista externa ou interna, num dos elementos rolantes (rolos ou esferas) ou na gaiola, e propaga-se depois para os demais componentes [20].

O diagnóstico correto e precoce de uma avaria pode evitar o seu agravamento, e ainda prevenir o mesmo tipo de problema em outros rolamentos, antes que se manifestem os mesmos sintomas. Podemos classificar as avarias dos rolamentos em três categorias principais [21].

Avarias devido a causas externas ao rolamento: montagem defeituosa ou realizada sem atenção, falta de manutenção, lubrificação insuficiente ou inapropriada, sobrecargas, vibrações, velocidade excessiva, temperatura elevada, poluição, etc. Avarias cujas causas estão numa má escolha inicial do rolamento, do seu tipo, da sua dimensão, das suas características funcionais. Avarias devidas à qualidade do rolamento: Uso de aço de má qualidade ou defeito na sua estrutura, problemas de geometria interna, da qualidade das gaiolas, ou das juntas [22].

3.2. Causas Típicas de Danos em Rolamentos

A grande maioria das avarias precoces em rolamentos devem-se a um conjunto relativamente reduzido de fontes: desalinhamento, desequilíbrio, procedimentos de montagem, problemas de lubrificação e vedação. A fonte desses problemas pode ser identificada pela aplicação de sistemas de análise de condição, antes de ocorrer a falha, ou no caso onde a falha já ocorreu, pela intervenção de especialistas que podem ver as marcas deixadas no rolamento e associá-las à fonte do problema [23].

As causas típicas de danos em rolamentos são os seguintes [22]:

1. Montagem impropria

- Método de montagem incorreto, ferramentas inadequadas
- Falta de limpeza
- Ajustamento com muito aperto
- Ajustamento muito folgado
- Posição inclinada

2. Solicitação excepcional em serviço

- Carga excessiva, carga insuficiente
- Vibrações
- Velocidade de rotação excessivo

3. Influencia ambientais desfavoráveis

- Calor externo
- Poeira, sujidade
- Passagem de corrente elétrica
- Humidade
- Meio agressivo

4. Lubrificação imperfeita

- Lubrificante inadequado
- Falta de lubrificante
- Excesso de lubrificante



Figura 14: Falha de lubrificante [24]

Os rolamentos de esferas dependem da presença contínua de uma película muito fina de lubrificante entre as esferas e a pista, e entre a gaiola, anéis de rolamentos e esferas. Lubrificação insuficiente ou ineficaz resulta no desgaste excessivo de esferas, anéis e gaiolas e vai levar ao fracasso, sobreaquecimento e, posteriormente, a avarias catastróficas.

Normalmente aparece uma cor azul acastanhado nas esferas (Figura 14). As falhas são normalmente causadas por rotura do filme ou temperatura excessiva que degradam as propriedades do lubrificante [24].

3.3. Sinais Externos de Deterioração

Todos os sistemas rotativos em funcionamento são sujeitos a: vibrações, ruídos, elevação de temperatura. Estes fenómenos são normais desde que não excedam um certo nível, mas devem ser interpretados como sinais de alerta se ultrapassarem o normal. É impossível fixar um nível de referência para diversos sinais, visto que eles dependem de numerosos fatores: carga, velocidade, lubrificação, tipo de rolamento, etc. Para todo acompanhamento preventivo, será então necessário estabelecer um ponto prévio que defina o nível de referência. Por comparação, será então possível detectar as anomalias [25].

Estes sinais são:

Vibrações - Elas são perceptíveis ao tato ou com auxílio de aparelhos como sensores e transdutores (medidores de frequências e de amplitude), estes últimos aparelhos podem inclusive provocar alerta a paragem da máquina em questão [25].

Ruídos - Certos ruídos anormais podem aparecer imediatamente. Por exemplo, aqueles provenientes de marcações de corpos rolantes devido a uma montagem incorreta, sem precauções e outros, progressivamente. A alteração de ruído em relação ao provocado pelo funcionamento normal dos rolamentos pode ser associada a deterioração ou avaria. A sua amplitude é função dos tipos de avarias e do grau de severidade [25].

Elevação da temperatura - Um rolamento em funcionamento atinge temperaturas acima da temperatura ambiente. Este aumento da temperatura é função de diversos fatores e estabiliza a um nível que pode ser tomado como referência se for normal para a montagem em questão. Cada vez que a temperatura aumentar esta deve ser considerada como revelador de uma anomalia [25].

3.4. Possíveis Avarias nos Rolamentos

Os mecanismos de desgaste superficial podem ser pensados em duas categorias distintas: uma com a interação entre as superfícies metálicas (lubrificação mista ou limite) e outra onde o filme lubrificante separa completamente as superfícies (lubrificação por filme completo).

A seguir serão descritos de uma forma genérica os principais modos de desgaste e de falha do rolamento segundo Scoot, R. [26].

3.4.1. Fadiga Superficial

A fadiga superficial começa com o regime de lubrificação reduzida, e com uma perda do filme lubrificante normal. Isto provoca alguns contactos de metal com metal e ocorre o movimento de deslizamento, que provoca danos nas superfícies, (ver Figuras 15 e 16). Os pontos mais rugosos da superfície do metal são removidos e os danos de superfície são acoplados com a carga cíclica dos rolos que rolam sobre as pistas. Isso cria microfissuras rugosas e micro-fragmentação. As fissuras começam na superfície e migram para dentro do metal [26].

A fadiga superficial em rolamentos também pode ocorrer como resultado da deformação plástica, isto é, pode ocorrer após muitos ciclos de alta tensão de flexão do metal, estas causam fissuras na subsuperfície do metal, que propaga-se para a superfície, resultando num pedaço de metal na superfície que vai sendo removido. Começa com inclusões ou falhas nas pistas abaixo da superfície. Microfissuras subsuperficiais Isto provoca alguns contactos



Figura 15: Fadiga superficial inicial em uma pista do anel externo de um rolamento ref.[SKF/2012]



Figura 16: Fadiga superficial inicial no anel externo de um rolamento autocompensador de rolos ref.[SKF/2012]

de metal com metal, causando deformação elástica (flexão) do metal. Isto é comum em todos os elementos de rolamentos e dentes de engrenagens, que operam no regime elastohidrodinâmico (EHD) de lubrificação. A tensão de contacto concentra-se num ponto abaixo da superfície do metal. Estas microfissuras normalmente propagam-se até à superfície, e resultam na remoção de um pedaço de material. Aparecem como danos na superfície ou desgaste referido como fragmentação. Fadiga subsuperficial não é um problema comum se forem usados metais de melhor qualidade para suportar o seu fabrico, na maior parte dos rolamentos a falha ocorre primeiro por um outro mecanismo de desgaste. Falhas subsuperficiais por fadiga num rolamento resultam do facto do rolamento estar fora da sua vida útil normal e ocorrem devido às cargas, velocidades, espessura do filme de lubrificante a que o rolamento está exposto. Melhorar a filtragem reduz a deformação plástica e, portanto, indiretamente reduz a ocorrência de fadiga de superfície [26].

Ding, J. [27], no seu trabalho intitulado " Wear debris analysis, oil analysis" afirma que o desgaste por fadiga de rolamentos geralmente começa com micropitting - pequenas áreas na superfície dos rolamentos onde o material é removido devido a carga repetida. Na sua fase final a fadiga superficial provoca significativas fragmentações da superfície denominadas «spalling» que são grandes crateras, muitas vezes de várias centenas de microns de diâmetro, que são facilmente visíveis a olho nu. Ele também afirma que a fadiga superficial começa com microfissuras na superfície ou na subsuperfície do contacto. Com a alta pressão sobre as superfícies de contacto, as microfissuras subsuperficiais propagam-se paralelamente à superfície, fazendo com que o material seja removido formando partículas de desgaste e fadiga.

No catálogo "SNR Industry" encontra-se também a descrição do desgaste por fadiga e a sua evolução. De acordo com este catálogo, num rolamento submetido a uma carga, as forças que aparecem na zona de contacto dos corpos rolantes e das pistas podem atingir valores muito significativos.

As tensões de corte induzidas desenvolvem-se nas áreas de contacto, passando no máximo a uma certa distância da superfície (alguns décimos de milímetro). É geralmente admitido que estas forças são a origem das fissuras, devido à passagem repetida dos corpos rolantes, as fissuras do material produzem-se e propagam-se pela superfície e a junção destas fissuras resulta no arrancamento de fragmentos de material.

O fenómeno vai ampliando, tornando os arrancamentos de material cada vez mais numerosos e significativos. O aparecimento de fissuras ou “pitting” é um fenómeno contínuo que se desenvolve progressivamente e que se acelera mais ou menos rapidamente após o aparecimento das primeiras fissuras (ver Figura 17). É então importante poder reconhecer os primeiros sinais da fissura/picagem do material que acarretará a curto prazo o fim da utilização do rolamento [25].



Figura 17: Aspecto das fissuras/picagem [25]

Aparecimento do “pitting”

Pequenos danos aparecem na superfície, ainda sem ligações entre eles. O estado da superfície degrada-se. O perfil geral da peça permanece inalterado mas os danos são denunciadores da fadiga subjacente.



Figura 18: Evolução da avaria [25]

Evolução do “pitting”

O pitting alastra e cria zonas de “spall”. Se o perfil geral da peça estiver inalterado, o estado de superfície é completamente destruído, revelando um estado de fadiga pronunciado. Pequenas escamas destacam-se e juntam-se ao lubrificante e contribuem para a aceleração da avaria (ver Figura 18) [23].

3.4.2. Desgaste Abrasivo

Neste subcapítulo é apresentado uma breve descrição do desgaste abrasivo, abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos.

Desgaste abrasivo - é considerada a forma mais comum de desgaste em máquinas lubrificadas. A contaminação



Figura 19: Desgaste abrasivo na pista do anel interno de um rolamento de rolos cilíndricos ref.[SKF/2012]

por partículas e as superfícies rugosas provocam danos às superfícies de contacto que estão em movimento [26] (ver Figura 19).

Abrasão a dois corpos - Abrasão a dois corpos ocorre quando os picos das rugosidades superficiais de uma das superfícies cortam diretamente a superfície do segundo corpo. O contacto ocorre no regime de lubrificação limite, devido à insuficiência de lubrificante ou rugosidade excessiva da superfície

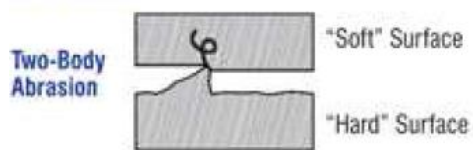


Figura 20: Abrasão a dois corpos [26]

que poderia causar alguma outra forma de desgaste. A viscosidade elevada do óleo, o aumento da dureza do metal e até a desmagnetização de rolamentos após aquecimento por indução durante a instalação podem ajudar a reduzir abrasão a dois corpos [26].

Abrasão a três corpos - Abrasão a três corpos ocorre quando um contaminante relativamente rígido, partículas de sujidade ou de desgaste de aproximadamente o mesmo tamanho que as folgas dinâmicas ou da espessura do filme de óleo, é intercalado e é comprimido entre as duas superfícies em contato, que estão em movimento relativo [26].

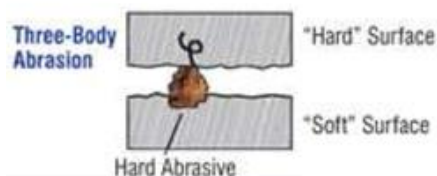


Figura 21: Abrasão a três corpos [26]

O catálogo “SNS Industry” descreve este tipo de desgaste como marcas de corpos estranhos e afirma que as marcas de corpos estranhos têm a mesma origem que o desgaste normal a 2 corpos. Isto é um defeito de proteção que permite às partículas estranhas penetrarem no rolamento. A passagem repetida destes corpos estranhos entre os corpos rolantes e a pista provoca a formação de múltiplas pequenas marcas que torna o rolamento ruidoso. A degradação do estado de superfície das pistas e dos corpos rolantes acelera a fadiga do material (ver Figura 22).

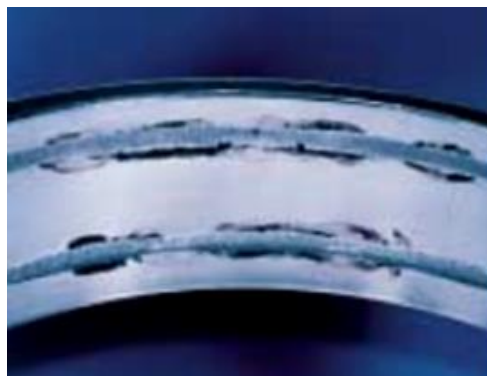


Figura 22: Oxidação e desgaste em rotação [25]

Sinais que auxiliam a identificação da abrasão a três corpos

- Rodagem mais ou menos intensa dos corpos rolantes e das pistas, estas últimas podendo apresentar um sulco longitudinal contínuo ou sectorial;
- Aparecimento de irregularidades e vibrações;

- Desgaste das gaiolas;
- Marcações de pequenas dimensões nas pistas dos anéis, apresentando as bordas ligeiramente curvas significativas de um afundamento do material;
- Redução anormal da duração de vida pela aceleração da fadiga do material;
- Ruído anormal.

A causa deste dano ocorre por falta de proteção do rolamento seja na colocação, seja durante a sua utilização e o principal responsável é a poeira. De fato, qualquer que seja sua natureza, e mesmo que ela seja proveniente de um local não industrial, a poeira possui sempre um poder abrasivo elevado, pode acelerar a fadiga do material.

Como prevenir

- Durante a montagem empregar as precauções de limpeza indispensáveis, limpando eixos e alojamentos, realizando a montagem nos locais livres de poeira;
- Não lavar os rolamentos novos;
- Utilizar um lubrificante limpo e manter os recipientes e as embalagens fechadas;
- Proteger todos os dispositivos para impedir que os detritos têxteis (palha, fibras ou qualquer poeira, areia, limalha, produtos químicos, entre outros) penetrem no rolamento.

3.4.3. Desgaste Erosivo, Adesivo e Gripagem

Desgaste por erosão é a perda de material que resulta de impacto repetido de pequenas partículas sólidas, líquidas ou gasosa, incidindo sobre a superfície, a uma velocidade significativa.

Fatores que influenciam o desgaste erosivo

- Forma da partícula;
- Tamanho da partícula;
- Dureza das partículas;
- Velocidade das partículas;
- Temperatura.

Erosão - Erosão pode ser considerada uma forma de desgaste abrasivo. Ocorre principalmente em escoamentos de fluidos a alta velocidade, onde os detritos de partículas sólidas, arrastadas pelo fluido (óleo), colidem sobre uma superfície desgastando-a (ver Figura 23). Os sistemas hidráulicos são um exemplo em que este tipo de desgaste pode ocorrer. As velocidade de escoamento tem uma influência significativa sobre estas taxas de desgaste, a qual é proporcional a pelo menos o quadrado da velocidade do fluido. Erosão ocorre tipicamente em bombas, válvulas e bocais. Erosão ocorre sem que haja contacto metal com metal.



Figura 23: Desgaste por erosão [26]

Erosão elétrica - Este tipo de desgaste ocorre quando uma corrente elétrica passa entre duas superfícies de metal (por exemplo, rolamento de rolos e suas pistas), através da película de óleo ou massa. Subdivide-se com base na gravidade dos danos. Erosão elétrica não deve ser confundida com a erosão causada por partículas.

Desgaste adesivo - Desgaste adesivo é a transferência de material de uma superfície de contacto para a outra. Ocorre quando altas cargas, temperaturas ou pressões causam soldaduras ou microsoldaduras entre duas superfícies metálicas em contato com movimento relativo, e corta o metal em áreas pequenas e discretas (ver Figura 24).

A superfície pode ficar áspera e irregular ou relativamente suave apresentando manchas características da deformação do metal. O metal é transferido de uma superfície de contacto para a outra. Isso pode ocorrer em anéis e cilindros, rolamentos e engrenagens. Adesão pode ser



Figura 24: Desgaste adesivo na pista do anel interno de um rolamento de rolos cilíndricos ref.[SKF/2012]

prevenida aplicando cargas mais baixas, evitando choques, e assegurar que o óleo tem o grau de viscosidade adequada. Se necessário devem-se usar aditivos de extrema pressão (EP) e aditivos anti-desgaste (AW) para reduzir os danos [26].

Segundo Ferreira, L. A. [18], a gripagem é um fenómeno que ocorre de forma súbita, que se caracteriza pela evolução descontrolada de fenómenos de adesão. É acompanhada pela emissão de fumo, ruído e pelo aumento da força de atrito e da temperatura [18].

Nos rolamentos de rolos cónicos, as gripagens são particularmente frequentes entre o grande anel dos cones e a face maior dos rolos. As gaiolas são destruídas parcial ou totalmente e às vezes laminadas sob os corpos rolantes Figura 26. Na última fase da progressão da avaria por gripagem ocorre soldadura total por aquecimento intenso dos corpos rolantes nos anéis (ver Figura 25).



Figura 26: Gripagem com incrustação das esferas [25]

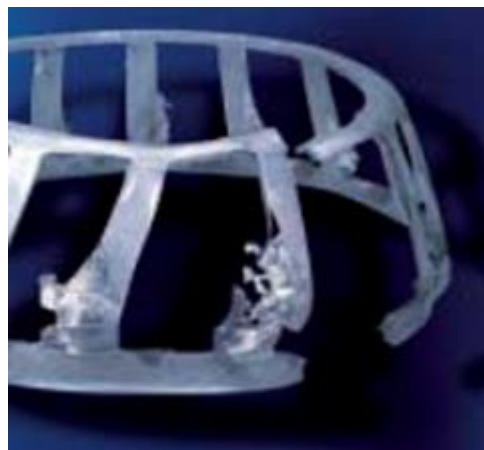


Figura 25: Detioração da gaiola devido a gripagem [25]

A gripagem dos rolamentos é inevitável na ausência de lubrificação. Se há insuficiência de lubrificante ou se ele for inadequado, pode haver uma ruptura do filme de óleo. Os elementos rolantes entram portanto em contacto metal contra metal com as pistas, as micro-adesões provocam o aquecimento local, o fenómeno amplifica-se rapidamente e provoca a gripagem. Nos rolamentos de rolos cónicos, tais gripagens podem ocorrer se a pré-carga aplicada (sobrecarga axial) for excessiva e o lubrificante for inadequado ou insuficiente. Afetam essencialmente a face maior dos rolos e o grande anel. Esta avaria ocorre frequentemente em novas montagens, se algumas precauções não forem tomadas: lubrificar convenientemente o rolamento, e se as tolerâncias de ajustamento do rolamento nos apoios são tais que permitam que o anel deslize (há o risco que o eixo no diâmetro interno ou o anel externo no seu alojamento rode, provocando um aquecimento intenso podendo provocar o bloqueio do rolamento e a gripagem de seus elementos). Podemos igualmente constatar por vezes fissuras que resultam deste fenómeno.

As velocidades elevadas com carga pouco significativas podem igualmente provocar a gripagem. Seja devido a inércia, seja provocada pelo lubrificante, os corpos rolantes não entram em rotação instantaneamente. O atrito resultante provoca um aumento da temperatura tal que as dilatações provocam a gripagem entre corpos rolantes e pistas. Esta avaria pode ocorrer mesmo sob carga se esta for essencialmente radial e se utilizarmos um lubrificante muito consistente. Nos rolamentos de rolos, os rolos que estão fora da zona de carga são frequentemente travados e têm tendência a deslizar provocando assim um aquecimento (ver Figura 27).



Figura 27: Gripagem de um rolamento autocompressor de rolos incrustação de rolos e rutura de borda [25]

Para evitar o problema de lubrificação temos que seguir atentamente as normas de lubrificação recomendadas e utilizar um lubrificante adequado à aplicação. A escolha do lubrificante é de extrema importância. Ele deve resistir às altas pressões que aparecem nas zonas de contato entre os corpos rolantes e os anéis. Escolhe-se, portanto, assim como o modo de lubrificação, em função da natureza das superfícies, as cargas, as velocidades, as temperaturas de funcionamento. Deve-se cuidar particularmente da lubrificação dos rolamentos de rolos cónicos sob a gaiola, na direção da base maior dos rolos, antes do funcionamento e após uma nova montagem.

No caso de grande velocidade, deve-se escolher um lubrificante que permita a colocação em rotação rápida dos corpos rolantes. Poderá ser útil prever uma pré-carga inicial para assegurar seu funcionamento [25].

3.4.4. Desgaste por, Cavitação, Deformação Plástica

Cavitação - Esta é uma forma especial de erosão em que bolhas de vapor, sob a forma de fluido nas regiões de baixa pressão são recolhidas das regiões de maior pressão do sistema de óleo. As implosões podem ser suficientemente potentes para criar furos ou buracos, mesmo nas superfícies endurecidas. Este tipo de desgaste é mais comum em bombas hidráulicas, especialmente aquelas cujas entradas de sucção estão restringidas ou estão a operar a

altitudes elevadas. Restringindo a entrada de óleo na bomba de sucção reduz a pressão sobre o óleo e, assim, tende a criar mais bolhas de vapor. A cavitação pode também ocorrer em apoios onde a pressão do fluido aumenta na zona de carga do rolamento. Para criar condições de cavitação não é necessário a ocorrência de contacto metal com metal [26].

- **Cavitação vaporosa** – o processo começa com o arrastamento de vapor de água no óleo, depois, um aumento de pressão faz com que o colapso produza um microjacto que colide com a superfície e provoca o dano;
- **Cavitação gasosa** - como as bolhas de gás são incompressíveis viajam para regiões de alta pressão, que entrando em colapso, geram pressões intensas e danificam as superfícies [26].

Deformação Plástica - É provocada por impacto ou sobrecarga nas superfícies metálicas, causando deformação permanente. A deformação plástica pode ser dividida em três categorias:

Sobrecarga - caracteriza-se por carga estática, choque ou impacto fortes durante o funcionamento, causando danos permanentes nas superfícies sem arrancamentos ou soldaduras. Um exemplo ocorre nos rolamentos quando o impacto faz com que os rolos criem uma série de bandas na superfície da pista do rolamento em intervalos que correspondem exactamente ao espaçamento dos rolos;

Indentação de detritos - é uma forma de deformação plástica, mas causada por uma partícula presa nas folgas entre os dois elementos com movimento relativo.

Indentação do manuseamento - é semelhante ao de detritos, mas resulta quando um rolamento cai ou quando é martelado, causando sobrecarga localizada. Também pode ser causada por objetos duros ou pontiagudos que provocam arrancamentos [26].

3.4.5. Avarias Devido a Montagem

Rolamentos de esferas

A avaria provocada por montagem deficiente é das mais comuns e aparece se ocorrer choque ou quando é aplicado um esforço sobre o anel móvel. Se o choque gerar uma carga instantânea que ultrapasse o limite elástico do material, as marcas permanentes formam-se nos pontos de contato das esferas com as pistas. Estas marcas provocam um ruído anormal e são o início de futuras fendas ou fissuras.

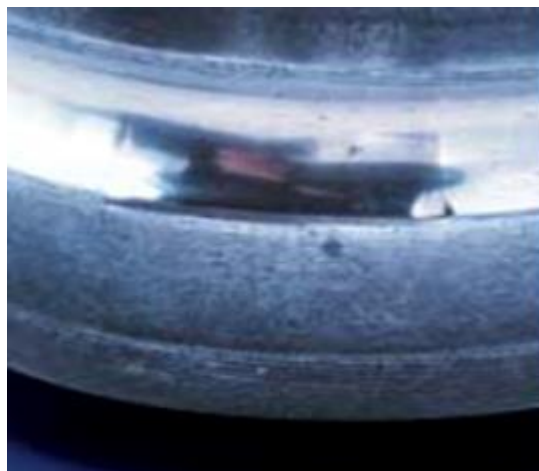


Figura 28: Marcas devido a montagem no eixo com apoio no anel externo [25]

Os choques podem acontecer devido à montagem dos rolamentos por percussão ou por quedas acidentais dos rolamentos sobre um solo duro. Nos rolamentos de esferas, as marcas são geralmente cónicas e afetam sobretudo as bordas das pistas. Elas situam-se quer na totalidade da circunferência quer num setor mais ou menos extenso. A separação destas marcas corresponde à das esferas. O fundo da marca é brilhante mas podem ainda ser observadas marcas da retificação (ver Figura 28).

Para evitar este problema sabendo que as tolerâncias de ajustamento são tais que o anel a ser colocado deve apertar, não se pode apoiar no anel oposto sobretudo quando a montagem deve ser realizada por percussão. Se o anel apertado tem acesso difícil, utiliza-se um tubo com o mesmo diâmetro e de comprimento apropriado.

Rolamentos de rolos cilíndricos

Nas pistas podem aparecer riscos mais ou menos profundos paralelos à sua geratriz, frequentemente com arrancamento de metal, cuja distância entre marcas corresponde geralmente ao período de rotação dos rolos (perímetro) Figura 25.



Figura 29: Arrancamento de material na pista na pista de um anel externo [25]

Rolamentos de rolos cónicos

Nesse tipo de rolamentos as marcas podem aparecer se o cone for utilizado para encaixar o rolamento no seu alojamento (ver Figura 30).



Figura 30: Fissuras no centro da pista de rolamento [25]

Este problema surge se for forçada a introdução aplicando forças de montagem excessivas, seja por pressão ou por percussão, os rolos riscam mais ou menos profundamente a pista do anel receptor, estes riscos podem ser superficiais ou profundos. Para evitar a avaria não se deve forçar um anel contra o outro. A colocação de um eixo com um anel interno montado, é recomendável para fazer rodar este eixo ao mesmo tempo que o apresentamos ao outro anel. A rotação auxiliará os rolos a ajustarem corretamente evitando as interferências. É recomendado lubrificar bem o rolamento com a massa antes da montagem, a ausência de massa facilita as interferências e a gripagem dos rolos [25].

3.4.6. Vibrações

Os anéis de rolamentos apresentam, nas pistas, marcas brilhantes ou baças, mais ou menos extensas, cuja separação corresponde nos casos simples à rotação dos corpos rolantes. Podemos entretanto constatar a presença de numerosas marcas que se sobrepõem ou se intercalam. É sempre possível encontrar nestas marcas a separação dos corpos rolantes. Uma análise mais cuidada permite constatar que as marcas são devidas a desgaste do material e não ao seu afundamento como no caso de marcas por choque. Esta avaria é também chamada de



Figura 31: Falso efeito brinell em um rolamento de esfera [25]

falso Brinell (ver Figura 31).

O efeito de falso Brinell afeta os rolamentos em estado estático ou em oscilação de baixa amplitude, mas sempre na presença de vibrações. Pode no entanto afetar um rolamento em rotação quando os dois anéis rodam simultaneamente em sincronismo total (caso dos rolamentos pilotos).

O mecanismo da avaria pode ser assim esquematizado sob efeito conjugado de uma pressão, mesmo fraca e vibrações, o lubrificante tende a escapar da zona de carga, e não lubrifica correctamente as superfícies de contacto entre os corpos rolantes e as pistas. A energia de vibração provoca então as micro-adesões ou as micro-gripagens e em consequência, os arrancamentos de metal. As partículas arrancadas oxidam-se como no caso da corrosão de contacto e seu poder abrasivo contribui para a aceleração do fenómeno. Este tipo de avaria é encontrada nos rolamentos que equipam as máquinas paradas mas sujeitas a vibrações intensas, nos rolamentos em rotação quando os dois anéis giram na mesma velocidade angular e permanecem em consequência fixos um em relação ao outro.

Como evitar este problema

- Calçar o eixo dos motores geradores e outras máquinas similares para seu transporte;
- A rotação mesmo lenta das máquinas paradas em zona de vibrações facilita a repartição do lubrificante e evita que as cargas se apliquem permanentemente num ponto único das pistas;
- Os rolamentos de grandes dimensões devem ser armazenados horizontalmente fora das zonas de vibração;
- Para as montagens em descanso, devem utilizar-se lubrificantes fluidos mais aptos a infiltrarem-se entre as superfícies de contacto, que os lubrificantes consistentes [25].

3.4.7. Avarias Provocadas por Correntes Eléctricas

Crateras - picadas de bordas unidas em séries ligadas em cadeias mais ou menos longas (ver Figura 32).

Estrias - Sucessão de marcas estreitas lado a lado que se sucedem na zona de pistas submetida à carga (ver Figura 33).



Figura 32: Crateras [25]



Figura 33: Estrias [25]

Esta avaria pode-se produzir nas máquinas rotativas que equipam diversos equipamentos ou em máquinas (máquinas-ferramentas, material ferroviário, conversores, motores, etc.) quando o rolamento se encontra na passagem de uma corrente de fuga e quando ele for a única ligação entre a massa e o solo.

Corrente de forte intensidade: Nos contatos de proximidade entre corpos rolantes e pista e mesmo através de filme lubrificante, surgem arcos provocando o aparecimento de pontos quentes onde se produzem as fusões.

Corrente de fraca intensidade: Provocam o aparecimento de uma alteração de superfície periódica que, com a rotação, aparece sob a forma de coloração cinza.

Como prevenir este problema

- Verificar ou estabelecer a ligação à terra das máquinas rotativas incluindo suas partes móveis;
- Verificar os isolamentos, limpar os coletores dos motores para evitar as fugas de corrente [25].

3.4.8. *Desgaste corrosivo*

Desgaste corrosivo é o dano da superfície resultante da exposição a um ambiente reativo, atmosfera, acumulação de humidade, bactérias, eletrólitos ácidos, processos químicos ou subprodutos de lubrificante.

Técnica para reduzir a corrosão

- Resistência à corrosão metalúrgica;
- Controlo de contaminação do fluido (calor, humidade, água, ácidos, bactérias);
- Barreira de proteção (revestimentos, tratamentos de superfície, etc);
- Controladores de corrosão aditivos (inibidores de oxidação, passivadores de metais).

Corrosão por humidade

Envolve a remoção de material, ou perda, por reação química oxidativa da superfície do metal, na presença de humidade (água), na Figura 34 em baixo pode observar-se um exemplo da corrosão de humidade no anel interno de um rolamento esféricos.

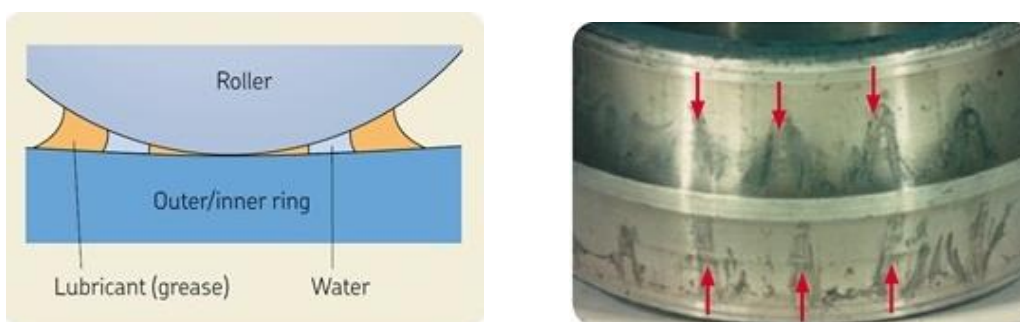


Figura 34: Corrosão de humidade no anel interno de um rolamento esféricos ref.[SKF/2012]

É a dissolução de um metal líquido eletricamente condutor por baixa amperagem e pode envolver a fragilização por hidrogénio. É acelerado, como todas as reações químicas, por aumento da temperatura. Não é necessário contacto de metal-com-metal, ocorre em lubrificação por filme completo. A corrosão é muitas vezes causada pela contaminação ou degradação de lubrificantes em serviço. Muitos lubrificantes contêm inibidores de corrosão que os protegem contra esse tipo de ataque. Quando os aditivos do lubrificante se esgotam devido ao serviço prolongado ou excessiva contaminação por combustão, humidade ou outros gases, os inibidores de corrosão não são capazes de os proteger contra o ácido corrosivo do fluido (ou soda cáustica) e a corrosão pode ocorrer." Pits" aparecerão na superfície do metal, que foi exposto ao ambiente corrosivo. Esta pode ser a superfície inteira de metal ou apenas a parte inferior de metal, que pode ter sido submersa em água não drenada do reservatório de óleo ou nos pontos de contacto dos rolos com as pistas. Formas leves de corrosão por humidade resultam em manchas superficiais ou gravura e formas mais graves são denominadas corrosão tipo pitting, eletro-corrosão ou oxidação [26].

Corrosão de Contacto

Estão localizados no diâmetro interno, no diâmetro externo ou nas faces de apoio do rolamento. A corrosão de contacto apresenta sob a forma de manchas rosas, escuras ou pretas mais ou menos extensas (ver Figura 35). A observação com ampliação revela um ataque mais ou menos profundo das superfícies afetadas.



Figura 35: Corrosão de contato no diâmetro interno e na face de apoio [25]

Nas zonas de deslizamento, as manchas deixam traços de oxidação e nos casos avançados, anéis e pistas, são cobertos de uma pasta escura formada pelos óxidos misturados com o lubrificante. Se a corrosão for profunda pode, no caso de rolamentos de pequena secção, provocar a rutura destes anéis sob carga.

Origem do problema

O anel que roda em relação à carga deve ser montado com aperto para impedir qualquer movimento de rotação deste anel sobre o apoio. Se a fixação for insuficiente, e em consequência se houver folga, o veio do diâmetro interno, ou o anel externo do rolamento no seu alojamento, rodam lentamente. Em caso de contacto seco sobre os apoios, as gripagens localizadas provocam arrancamentos de finas partículas de metal no rolamento e nos apoios dos veios e dos alojamentos. Estas partículas oxidam-se rapidamente se a lubrificação não alcançar estas zonas, e o seu poder abrasivo tende a acelerar este fenómeno. Quando os rolamentos giram e vibram nos apoios, a corrosão de contacto afeta igualmente as faces e isto pode ocorrer quando o bloqueio axial é insuficiente ou quando se anula por degradação de um calço ou pelo desaperto parcial de uma porca. A zona do rolamento em questão reproduz então exatamente, no anel, o perfil correspondente ao apoio ou ao anel de bloqueio.

Como evitar este problema

- Controlar a geometria e as tolerâncias de ajuste dos eixos e dos alojamentos para assegurar a fixação do rolamento onde for necessário;
- Verificar a fixação conveniente das porcas de bloqueio axial do rolamento;
- Em reposição, recarregar eventualmente os eixos.

Corrosão por Oxidação

Para identificar a corrosão por oxidação é necessário ter atenção a oxidação localizada ou generalizada do rolamento. Ou as manchas mais ou menos extensas de coloração avermelhada ou pretas com ataque da superfície em questão ou cavidades (ver Figura 36).

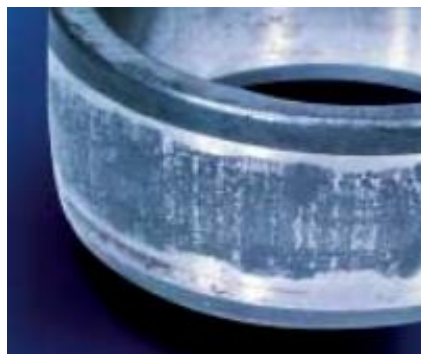


Figura 36: Oxidação em funcionamento (entrada do líquido) [25]

Origem do problema

- Introdução acidental ou sistemática de humidade ou de líquidos corrosivos atacando o aço ;
- Defeito de estanqueidade de montagem.

A corrosão pode ser sistemática quando o rolamento trabalha em atmosfera saturada de humidade e quando é submetido a períodos alternados de funcionamento e de paragens suficientemente prolongadas para que a temperatura do componente retorne ao valor ambiente. Em período de funcionamento a temperatura do rolamento aumenta, o ar contido no seu alojamento dilata-se e escapa. Na paragem, o retorno à temperatura ambiente é acompanhado de um refluxo de ar saturado de humidade que se condensa no rolamento.

A renovação frequente do ciclo provoca no depósito uma quantidade crescente de água que se mistura com a massa, não desaparecendo totalmente durante a fase de reaquecimento. A corrosão estende-se progressivamente ao conjunto dos elementos internos. Os seus efeitos são comparáveis aos provocados pela poeira abrasiva. As capas oxidadas cedem sob pressão dos corpos rolantes e este óxido fosforizado acelera por sua vez a abrasão.

A presença de manchas corrosivas permite uma identificação sem dúvidas do problema. De fato, elas não afectam unicamente as partes móveis do rolamento mas todo o seu conjunto, incluindo as faces, os diâmetros e as gaiolas.

Como evitar este problema

- proteções adequadas;
- modificar o ambiente através de uma ventilação apropriada;
- evitar as projecções líquidas sobre os vedantes;
- utilizar um lubrificante adequado [25].

3.5. Análise de Avarias

A análise de lubrificantes para detetar falhas ou desgaste anormal é uma prática útil em aplicações de equipamentos móveis. Nos últimos anos, novas abordagens e técnicas têm sido propostas para melhorar a detecção de falhas iniciais em rolamentos e caixas de engrenagens usando a análise de resíduos de desgaste. Estes métodos são mais sistemáticos e funcionais, começam com melhorias no processo da amostra para enriquecer os dados e resultados através da utilização de estratégias e táticas específicas. Confirmada a deteção, a fase final de análise envolve a identificação de partículas de desgaste com as técnicas clássicas e avançadas [28].

3.5.1. Estratégias de Análise de Partículas de Desgaste

Segundo Fitch, J., da Noria Corporations [28], o objetivo comum quando se trata de usar análise de resíduos é atingir o mais alto nível de confiabilidade da máquina, ao menor custo possível. No entanto, para alcançar este objetivo, vários objetivos secundários devem ser sistematicamente visados e alcançados. Estes objetivos serão referidos como estratégias e, em suma, definem o caminho para a aplicação da análise de partículas de desgaste de modo a alcançar a confiabilidade da máquina. As estratégias mais importantes são indicadas abaixo.

Detetar a falha o mais cedo possível - Para minimizar o custo da reparação e interrupção do processo global resultante de falha da máquina, os problemas devem ser detetados o mais cedo possível. Com essa estratégia simples, os problemas podem frequentemente ser resolvidos se a avaria for detectada antes de se tornar muito grave. Por outro lado, a deteção precoce de falha na sua fase inicial é frequentemente uma solução de baixo custo.

Identificar a origem de falha - O componente avariado ou parte dele é muitas vezes difícil de identificar sem parar a máquina e realizar uma inspeção interna. Muitas tecnologias diferentes e métodos analíticos, para além da análise de partículas de desgaste, ajudam ao isolamento ou localização do problema num único componente ou parte interna.

3.5.2 Tipos de Análises

Além da ferrografia, que serão abordadas em pormenor no capítulo 4, há outras técnicas eficientes na análise de avarias em rolamentos nomeadamente a análise de vibrações, ultrasons, termografia, análise de lubrificantes etc., que serão brevemente descritas nos pontos seguintes.

3.5.2.1. Análises de Vibrações

Mesmo geometricamente perfeitos, os rolamentos podem gerar vibrações devido a variações de conformidade, ou, dos esforços entre seus componentes. As variações dos esforços estão diretamente relacionadas ao número de elementos rolantes, esferas ou rolos. Ao longo do tempo, esses esforços tendem a causar fadiga nos componentes do rolamento [29].

A análise de vibrações é talvez uma das técnicas de análise mais adequada para avaliar as condições de funcionamento de uma máquina. Situações como desequilíbrio, estabilidade de chumaceiras, desalinhamento, folgas e desapertos, defeitos em rolamentos e rodas dentadas, etc., produzem comportamentos dinâmicos típicos passíveis de interpretação, para além de contribuírem para elevar o nível global de vibrações do equipamento mecânico. Uma vez efectuadas as medições, a questão fundamental prende-se com o que fazer com o resultado dessas medições. Se não existirem valores de referência, as medições poderão perder no todo ou em parte o seu interesse. Há pois que estabelecer critérios, definindo limites ou intervalos, que permitam a comparação com os valores medidos, a avaliação da importância dos desvios observados e a correlação dos mesmos com sintomas de eventuais avarias em desenvolvimento [30].

Os parâmetros mais vulgarmente utilizados para caracterizar a vibração dos equipamentos mecânicos são o deslocamento, a velocidade ou a aceleração associados a essa vibração.

Pode-se dizer que o deslocamento é o parâmetro mais adequado para quantificar o nível de vibração de baixa frequência (até 10 ou 20 Hz) uma vez que os danos resultantes são fundamentalmente devidos às elevadas deformações associadas ao processo vibratório.

Para frequências médias (entre 10 e 200 Hz, por exemplo), o parâmetro caracterizador mais adequado é a velocidade. Acima dos 200 Hz é mais adequado medir a aceleração, uma vez que

esta quantidade, sendo proporcional à força, representa melhor o factor que contribui mais para a avaria dos equipamentos.

TIPOS DE VIBRAÇÃO:

Vibração aleatória - Nas máquinas rotativas, são normalmente de origem hidráulica ou aerodinâmica. São exemplos a cavitação e certas instabilidades hidráulicas em bombas centrífugas, bem como turbulências de escoamento em ventiladores [30].

Vibração transiente - Nas máquinas ocorrem normalmente nos arranques e paragens, ou quando muda a condição de funcionamento. Têm interesse para a identificação de frequências de ressonância, velocidades críticas e choques em rolamentos e engrenagens [30].

Vibração periódica - São as mais importantes quando se trata de caracterizar a condição das máquinas. A cada ciclo de rotação dá-se uma repetição da ocorrência dos fenómenos na máquina, a maior parte dos quais se manifestam na forma de vibrações periódicas [30].

Finalmente e no caso especial da análise de condição dos rolamentos, é vulgar encontrar aparelhos que medem as vibrações e as quantificam através da “spike energy” (designação de marca da IRD Mechanalysis). Os rolamentos tendem a deteriorar-se a partir do aparecimento de falhas que produzem choques na passagem das esferas ou rolos pelo local das mesmas. É pois a ocorrência de impactos entre as peças metálicas que caracteriza as avarias dos rolamentos. À medida que a deterioração progride, estes choques aumentam em número e severidade. Nas análises de rolamentos procura-se detectar e contar estes impulsos de alta-frequência apresentando o resultado da análise sob a forma de “spike energy” ou “BCU” (bearing condition units). Numa análise de vibrações é importante distinguir as marcas normais, que nada significam em termos de vida útil do rolamento, das anormais que indiciam avarias. O exame dessas marcas permite fazer um diagnóstico que no futuro nos ajudará a prevenir a ocorrência de avarias semelhante. A vibração produzida por um rolamento depende, obviamente, do seu estado de degradação. Uma fissura é detectada pela passagem das esferas ou rolos pelas superfícies (pista interior e exterior). Um rolamento com defeitos produz componentes de vibração que não são múltiplos da frequência de rotação do veio (não-síncronos), que estão relacionadas com a passagem das esferas pelas pistas interior (BPI) e exterior (BPO), a frequência da gaiola (FT) e a frequência de rotação das próprias esferas (BS). Para além das quatro frequências características (a baixas frequências) podem aparecer frequências elevadas (> 500Hz e <20kHz) de ressonância estrutural das caixas dos rolamentos e vibrações a frequências muito elevadas (ultra-sons), características do início das avarias [30].

3.5.2.2. Ultra-Sons

Todos os elementos rotativos produzem forças de atrito com emissão característica de ultra-sons. Estas emissões podem ser disfarçadas por vibrações de baixas frequências nos primeiros estágios de avaria. Um equipamento de ultra-sons equipado com tecnologia digital pode medir a intensidade dos sons ou vibrações de elevadas frequências resultantes das forças de atrito, podendo monitorizar e identificar alterações ao padrão normal indicadoras de início de avaria. A análise de vibrações é insuficiente em rolamentos e caixas de engrenagens de baixas velocidades, pois o ruído de baixa frequência confunde-se com as frequências características da avaria desses elementos. É nestes casos que a análise de ultra-sons contribui decisivamente para a análise eficaz das avarias [31].

Num rolamento o lubrificante absorve energia de fricção entre os elementos rolantes. A vibração acústica é baixa quando o rolamento tem lubrificação adequada mas se houver roturas do filme lubrificante, mesmo que não ocorra desgaste significativo, nem ocorra aumento significativo da força de atrito, dessa energia de vibração aumenta significativamente. Um aumento de 8 a 10 dB μ V acima do valor normal (histórico) indica falha de lubrificação [31].

3.5.2.3. Termografia

Os campos de aplicação da técnica de termografia são numerosos, passando pela medicina, construção civil, electrotecnia e mecânica. Todos os sistemas mecânicos dissipam energia térmica durante o seu funcionamento normal, o que permite à termografia avaliar a alteração das suas condições de funcionamento em relação ao normal. Todos os equipamentos mecânicos sujeitos a atrito, por exemplo: rolamentos ou transmissões, ou sujeitos a trocas térmicas, tipo revestimentos refractários internos ou externos, podem ser inspeccionados para verificação de pontos de fuga de calor pela Termografia, sem nenhum tipo de contacto físico com o equipamento [32].

A termografia - é uma técnica que permite registrar de forma gráfica ou visível, a radiação no espectro Infravermelho que todos os corpos emitem acima do Zero Absoluto (-273,15 ° C). Em termos práticos, utiliza-se uma câmara especial cujo elemento sensor electrónico é sensível a

uma determinada faixa de radiação infravermelha. Além de registrar sem contacto a radiação emitida pelo alvo, transforma-a numa imagem visível ao olho humano. Assim podemos ter "imagens térmicas" de todos os objectos dentro da faixa de alcance da câmara [32].

Os problemas de rolamentos geralmente são detectados por alteração de padrão de temperaturas ou por comparação de temperaturas entre rolamentos a funcionar em condições semelhantes.

Limitações do Método

- A maior limitação é o acesso. A Termografia necessita de acesso direto ao objeto que se procura analisar. Se houver algum objecto entre o Termovisor e o alvo, ele terá de ser retirado para que seja possível a formação da imagem térmica;
- Outro obstáculo é a Emissividade. As superfícies polidas apresentam baixa emissividade (0.1), enquanto que corpos com superfícies oxidadas e rugosas, a Emissividade é alta e, a maior parte do calor que chega a superfície é irradiado para o ambiente (0.95).

Vantagens da Termografia

- Pode-se medir com facilidade a temperatura de objetos móveis e de difícil acesso;
- Ao ser uma técnica sem contacto não interfere com o funcionamento e comportamento próprio do elemento a medir;
- Facilidade e rapidez na medida de grandes superfícies;
- Medida de temperatura de vários objectos ao mesmo tempo;
- Tempo rápido de resposta. Permite seguir fenómenos transitórios de temperatura;
- Precisão elevada e alta repetibilidade. Fiabilidade das medições [32].

3.5.2.4. Análise de Lubrificantes

Qualquer sistema mecânico lubrificado é acompanhado por um processo de desgaste progressivo dependente das condições de funcionamento a que é submetido, das condições ambientais, assim como de outros factores (erros de projecto, de montagem, má utilização, etc.). Com equipamentos de análise modernos e uma correcta interpretação dos seus resultados, a análise de lubrificante pode ser usada como uma técnica eficiente de manutenção condicionada [7].

A análise de lubrificante é uma técnica não destrutiva bastante eficiente em diagnosticar o estado de qualquer componente lubrificado, bem como em determinar e avaliar a aptidão do lubrificante para continuar a exercer as suas funções originais. Existem essencialmente três tipos de análise de lubrificantes importantes a mencionar [7]:

Análise das propriedades do lubrificante – Este tipo de análise refere-se à determinação das propriedades físico-químico do lubrificante e seus aditivos.

Análise de contaminação – Os contaminantes são todo o material estranho que entra no sistema de lubrificação proveniente do ambiente exterior ou partículas geradas internamente. A contaminação compromete seriamente o bom funcionamento do equipamento e promove a degradação do lubrificante. A análise de lubrificante permite controlar os níveis de contaminação predefinidos.

Análise de partículas de desgaste – a monitorização e análise das partículas de desgaste geradas no equipamento permitem a detecção e avaliação de condições anormais de funcionamento que deste modo poderão ser atempadamente e efetivamente geridas pela manutenção.

A eficiência da análise de lubrificante implica a satisfação dos seguintes requisitos [7]:

- A amostra do lubrificante deve ser representativa de todo o sistema;
- Existe uma variedade de técnicas de análise complementares entre si;
- Existe uma precisão na interpretação dos resultados;
- A informação adicional confirma os resultados obtidos.

3.6. Conclusão

Segundo a opinião de alguns especialistas, as causas mais comuns para os defeitos nos rolamentos são: seleção incorreta, sobrecarga, defeito de fabricação, desalinhamento, montagem incorreta, armazenamento inadequado, lubrificação inadequada, excessiva ou insuficiente, falha de vedação e descargas eléctricas [20, 23]. Podem-se encontrar vários defeitos provocados por fadiga, abrasão, erosão, adesão, corrosão, gripagem entre outras formas de desgaste.

Foram apresentadas, resumidamente, estratégias para análise de avarias nos rolamentos e foi também apresentado algumas técnicas de análise de avarias nos rolamentos tais como, análise

de vibrações, ultra-sons, termografia e análise de lubrificantes. Após esse estudo conclui que a análise de partículas de desgaste é importante porque permite descobrir a falha num componente na sua fase inicial. Esta estratégia é importante uma vez que minimiza o custo da reparação. Outro aspecto importante na análise de desgaste de avarias é identificar a origem da falha, porque muitas vezes é difícil encontrar o componente avariado, a análise de partículas de desgaste através das técnicas existentes ajuda a localizar e isolar o componente avariado.

Relativamente as diferentes formas de análise, concluiu-se que a análise de vibração é uma das técnicas mais adequadas para avaliar os defeito em rolamentos, mas se não existirem valores de referência as medições poderão perder no todo ou em parte o seu interesse, logo é necessário definir limites ou intervalos que permitam a comparação com os valores medidos, ou recorrer os valores do fabricante.

Ultra-sons é uma técnica eficaz quando o ruído é de baixa frequência. A termografia permite detectar alteração de padrão de temperaturas. A análise de lubrificante é uma técnica bastante eficiente em diagnosticar o estado de qualquer componente lubrificado.

Visto que cada técnica fornece um tipo diferente de informação, o mais lógico seria usar mais de uma para uma análise mais eficiente do desgaste.

4. Ferrografia

4.1. Introdução

O desgaste é uma consequência inevitável do contacto entre as superfícies em movimento relativo dos componentes de uma máquina, tais como veios, rolamentos, engrenagens e casquilhos, mesmo que estes estejam devidamente lubrificados [9].

Segundo Dalley, R. J. [33], a Ferrografia é um meio de exame microscópico para identificar partículas de desgaste. Desenvolvido em 1971, foi inicialmente utilizada para precipitar magneticamente partículas ferrosas de desgaste presentes em óleos lubrificantes. O sucesso desta técnica na monitorização da condição de motores de aeronaves militares levou a novos desenvolvimentos para outros usos práticos. Um destes desenvolvimentos foi a modificação da técnica para precipitar as partículas não magnéticas de lubrificantes e outros fluidos. Hoje, em variados tipos de indústrias, a ferrografia é uma ferramenta valiosa para ajudar a determinar as necessidades de manutenção de máquinas, identificando as condições específicas de desgaste desses equipamentos.

A ferrografia é classificada como uma técnica de manutenção preditiva, embora possua inúmeras aplicações, tais como, o desenvolvimento de materiais e lubrificantes [34].

A Ferrografia pode ser usada não só para a determinação do tamanho, forma, composição e concentração das partículas geradas pelo equipamento, mas também para a identificação do principal mecanismo de desgaste que está a gerar as partículas [35].

A análise ferrografica das partículas de desgaste começa com a separação magnética das partículas de desgaste presentes no lubrificante, (óleo ou massa lubrificante), seguida de uma análise detalhada das partículas utilizando um microscópio ótico , FerroscoPIO [33].

4.1.1. Instrumentos e Técnicas de Ferrografia

Os avanços na instrumentação ferrografica abriram caminho para um estudo mais amplo e de classificação de partículas de desgaste produzidas por muitos materiais metálicos diferentes e compósitos, tanto magnéticos como não magnéticos.

Para estabelecer linhas de base precisas sobre o estado de condição da máquina, as amostras devem ser recolhidas periodicamente em pontos estrategicamente seleccionados e antes do filtro, de preferência com a máquina em funcionamento normal.

Existem dois instrumentos básicos de análise na técnica de ferrografia para avaliação do desgaste: o Ferrografo de Leitura Direta e o Ferrografo Analítico. A Ferrografia de Leitura Direta é usada para obter índices de desgaste e desta forma quantificar o desgaste. Quando resultam aumentos bruscos nos índices de desgaste, significa que ocorreu uma alteração no regime de desgaste e, recorre-se á Ferrografia Analítica para analisar visualmente as partículas de desgaste e identificar o local e a natureza do desgaste presente evitando assim avarias catastróficas [33].

4.1.2. Análise do Óleo Lubrificante

A análise de um óleo lubrificante é muito importante pois, permite identificar o desgaste ainda numa fase prematura, em qualquer componente lubrificado. A identificação desse desgaste é conseguida através da análise das partículas sólidas que se vão libertando das superfícies e ficam suspensas no óleo. Essa análise é realizada por meio de técnicas laboratoriais, dentro das quais destaca-se a ferrografia que é a mais importante. Esta técnica baseia-se nos princípios de que a maior parte dos sistemas mecânicos lubrificados desgastam-se antes de falhar, e o desgaste gera partículas metálicas. A natureza e a quantidade destas partículas dependem da causa e da severidade do desgaste.

A análise da natureza da partícula serve para identificar a sua origem e determinar qual o componente da máquina que está a sofrer desgaste. O estudo das dimensões das diferentes partículas é utilizado para identificar os diferentes níveis de desgaste e que podem ser classificados da seguinte forma [36]:

- Desgaste normal: partículas com tamanho médio entre 0,1 e 1,0 μm , as partículas maiores não ultrapassam 10 μm .
- Desgaste acentuado: neste caso, o intervalo de maior concentração das partículas é de 0,1 a 10 μm , as partículas maiores podem atingir 100 μm .
- Desgaste avançado: começa a aumentar a concentração de partículas na faixa de 100 μm .

- Desgaste catastrófico: a maior concentração de tamanhos de partículas está entre 100 e 1000 μm .

Segundo Smith, M. [37], o desgaste anormal evolui de partículas menores para partículas cada vez maiores. Esta mudança de tamanho está relacionada com o aumento da tensão à medida que as superfícies sob pressão alteram as suas formas originais. O efeito do aumento da temperatura no filme lubrificante, materiais de liga e o efeito cascata de desgaste em materiais com defeitos libertam partículas sucessivamente maiores que entram nos contactos provocando danos nas mesmas superfícies. Esta deterioração acelerada é o alerta inicial e o diagnóstico precoce da presença de um desgaste anormal. A Figura 37 representa um gráfico com a evolução anormal do desgaste.

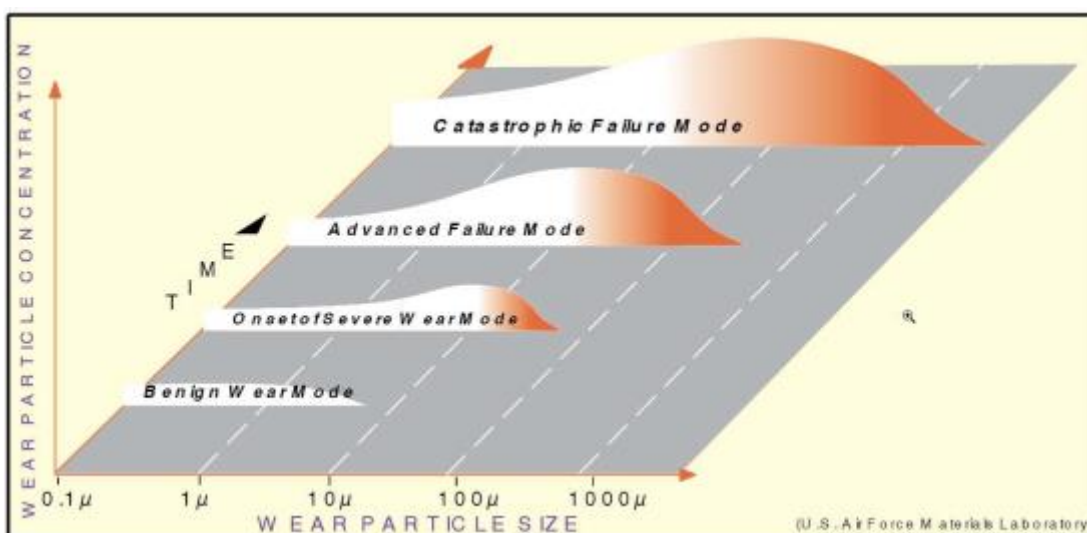


Figura 37: Progressão de tamanho de partículas em desgaste normal [37]

4.2. Ferrografia de Leitura Directa

Segundo Dalley, R. [38], a Ferrografia de Leitura Directa (DR) é uma ferramenta que permite a monitorização de um dado sistema lubrificado através da análise de amostras do lubrificante numa base periódica programada, e desta forma conseguir-se uma análise de tendência [9].

A Ferrografia de Leitura Directa opera pelo fluxo do lubrificante através de um tubo precipitador sobre um íman de alta potência. As partículas grandes – DL ($> 5\mu\text{m}$) são rapidamente atraídas pelo íman, enquanto que as partículas mais pequenas – DS ($< 5\mu\text{m}$) acumulam-se na extremidade de saída do íman. A luz é então transmitida através do tubo da

amostra e é recebida por foto sensores internos que medem a quantidade de luz que passa através do tubo [38] (ver Figura 38).

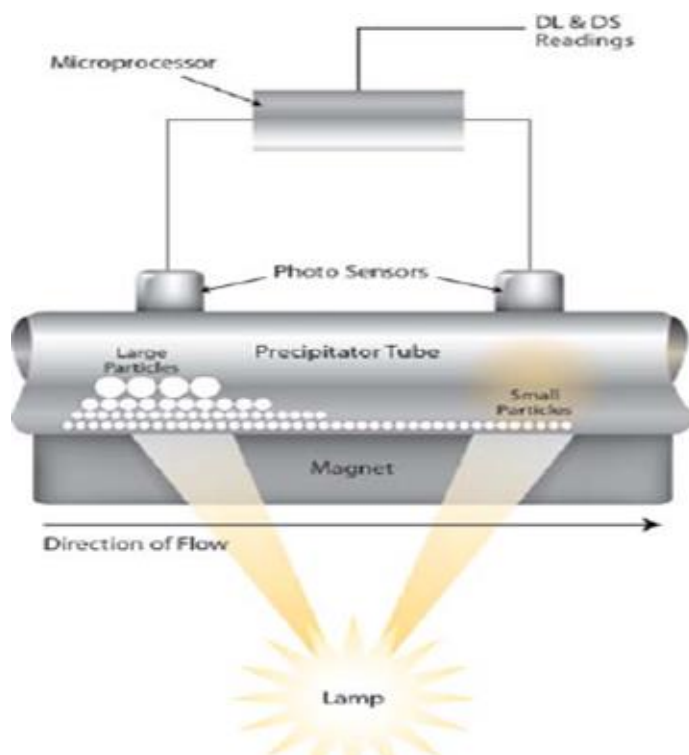


Figura 38: Ferrografia de leitura directa [39]

As concentrações de partículas (Dl e Ds) são quantificadas em dois locais: na entrada e a um ponto aproximadamente 4 mm mais abaixo no tubo.

Com base nas medições do índice de partículas de grandes dimensões - Dl , e do índice de partículas de pequenas dimensões - Ds , podemos obter os índices das concentrações de Partículas de Desgaste (CPUC), de Severidade de Desgaste (ISUC) e das Percentagens de Partículas Grandes (PLP). O fator de diluição (d) da amostra, para casos em que existe uma elevada concentração de partículas e o (Dl ou Ds atinge o valor 100). Nestes casos é necessário proceder à diluição da amostra [33].

- Índice de Concentração de Partículas de Desgaste;

$$CPUC = \frac{Dl - Ds}{d} \quad (4.1)$$

- Índice de Severidade do Desgaste;

$$ISUC = \frac{Dl^2 - Ds^2}{d^2} \quad (4.2)$$

- Percentagem de Partículas Grandes

$$PLP = ((DI - Ds) / (DI + Ds)) * 100 \quad (4.3)$$

Com estes índices, podem ser estabelecidas linhas de base de desgaste de máquinas, e as tendências de desgaste podem ser monitorizadas conforme exemplo mostrado na Figura 39. Deste modo, a ferrografia de leitura directa serve para alertar o pessoal de manutenção para uma determinada tendência de desgaste anormal [36].

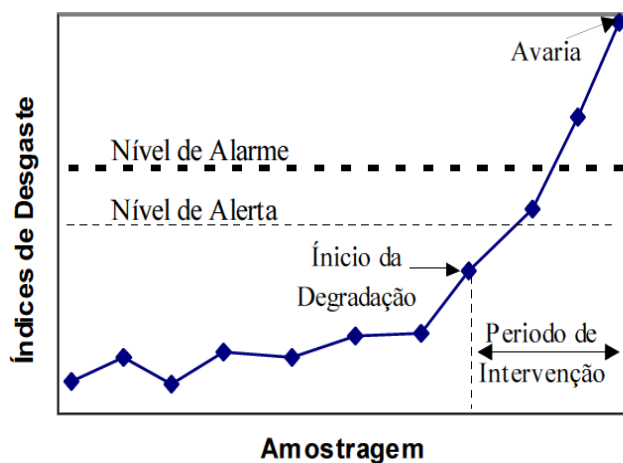


Figura 39: Curva de tendência da evolução do desgaste [7]

4.3. Ferrografia Analítica (FM III)

Informações adicionais sobre o desgaste presente numa amostra de lubrificante podem ser obtidas através da Ferrografia Analítica, que está representada esquematicamente na Figura 40 [9].

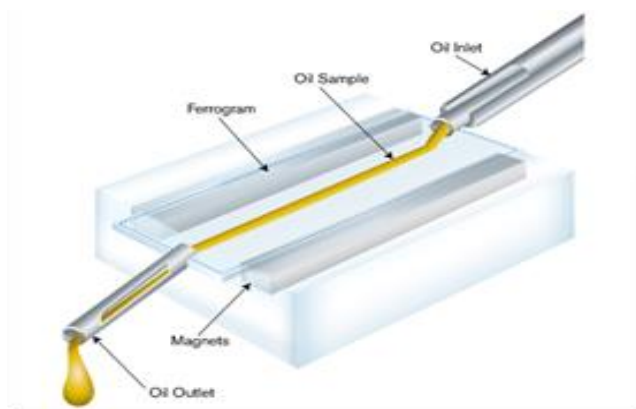


Figura 40: Ferrografo Analítico [39]

As partículas são depositadas e fixadas segundo o mesmo princípio do Ferrografo de Leitura Directa, mas neste caso sobre um substrato de vidro [7].

A amostra de óleo (1ml) é diluída num tudo de ensaio com solvente apropriado para melhorar a precipitação das partículas e adesão. De seguida, é colocada no suporte do Ferrografo que controladamente a faz fluir através da lâmina de vidro especialmente concebida para o efeito e que se designa de ferrograma (ver Figura 41). Devido ao campo magnético, as partículas ferrosas alinham-se transversalmente ao sentido do escoamento ficando as partículas maiores depositadas no ponto de entrada. Partículas de metais não ferrosos e contaminantes, não afectados pelo campo magnético, viajam a jusante e são depositadas aleatoriamente em todo o comprimento do ferrograma bloqueadas pelas partículas ferrosas alinhadas [33]. Embora esta técnica seja mais eficiente na detecção de partículas ferrosas, partículas com características não ferromagnéticas, como por exemplo, ligas de cobre, alumínio, etc., também se depositam devido a adquirirem algum magnetismo como resultado do atrito com o aço, por ficarem presas entre os filamentos das partículas ferrosas, ou simplesmente por sedimentação [6].

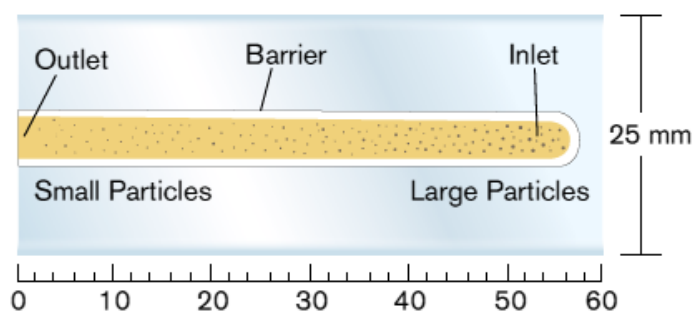


Figura 41: Distribuição das partículas em função do tamanho no ferrograma [39]

Após a passagem de toda a amostra sobre o ferrograma, uma lavagem com solvente apropriado é realizada para remover qualquer lubrificante remanescente. O solvente evapora rapidamente e as partículas ficam permanentemente aderidas no ferrograma [38].

Preparado o ferrograma, a fase analítica será então realizada utilizando um microscópio óptico bicromático (com luz transmitida e luz reflectida), onde várias características das partículas são observadas, tais como [7]:

- dimensão;
- morfologia;
- cor, brilho;
- tipo de superfície;

- tipo de bordos.

Algumas destas características estão associadas aos diversos tipos de desgaste e outras à identificação do material que está a ser desgastado. Deste modo é possível determinar qual o processo de desgaste (normal, fadiga, abrasivo, corrosivo, etc.) que se está a desenvolver no equipamento e nomeadamente, identificar o componente que se está a deteorar.

O ferrograma é examinado sob um microscópio bicromático polarizado, equipado com uma câmara digital. O microscópio utiliza tanto a luz refletida (iluminação superior) como a luz transmitida (iluminação inferior) para distinguir o tamanho, forma, composição e condição da superfície das partículas de metais ferrosas e não ferrosos. Existem alguns filtros que podem auxiliar o analista na distinção de partículas metálicas/não metálicas e translúcidas/não translúcidas (Figura 42). As partículas são classificadas para determinar o tipo de desgaste e sua fonte.

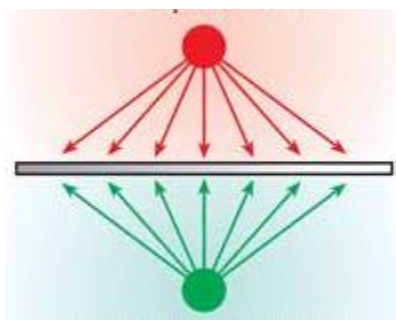

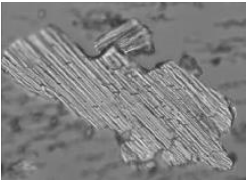
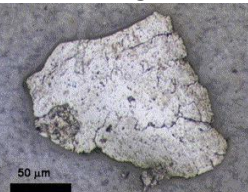
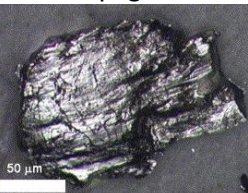
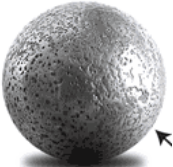


Figura 42: Filtros vermelho e verde para análise e distinção da partículas de desgaste

A identificação do material é normalmente acompanhada por um tratamento térmico do ferrograma a várias temperaturas, o que permite identificar as várias ligas de aço, cobre e alumínio, através das diversas alterações de cor (ver ponto 4.5.) [7].

A morfologia das partículas ajuda na identificação do modo de desgaste. Na seguinte tabela exemplificam-se alguns tipos de partículas de desgaste com as respectivas características e origens associadas.

Tabela 2: Morfologia das partículas

Tipo de Desgaste	Características das Partículas	Tamanho (μm)	Causa
<p>Abrasão</p> 	Partículas longas e finas/espirais tipo apara de maquinagem	> 5	Desalinhamento, contaminação por partículas duras, fissuras superficiais
<p>Combinado</p> 	Partículas laminares de formas irregulares (fadiga) com sulcos profundos (escorregamento)	> 15	Lubrificação imperfeita, condições de funcionamento severas (velocidade/carga)
<p>Fadiga</p> 	Partículas laminares Lascas de fadiga	> 15	Desgaste severo por rolamento (fadiga de rolamentos e nos dentes de engrenagens)
<p>Gripagens</p> 	Partículas de fadiga com marcas de adesão e deformação plástica	> 15	Gripagem e adesão nos dentes de engrenagem (linha do primitivo)
<p>Esférico</p> 	Partículas perfeitamente esféricas	<5	Indicação de fadiga por rolamento

4.4. Amostragem

O processo de amostragem é o aspecto mais crítico da análise de lubrificantes. A obtenção de uma amostra não representativa compromete toda a informação resultante da análise dessa

mesma amostra. Para obter uma amostra de óleo representativa é essencial alcançar dos objectivos [7]:

- **Maximização da densidade de informação:** a amostra deve ser obtida de tal modo que contenha a maior informação por mililitro de óleo. Essa informação refere-se ao estado de limpeza do óleo em termos de contaminação externa, consumo de aditivos e presença de partículas de desgaste geradas na máquina;
- **Minimização da distorção de informação:** a amostra deve ser retirada de modo a que a concentração de informação seja uniforme, consistente e representativa. É importante garantir que a amostra não é contaminada durante e após o processo de amostragem.

Para a obtenção de uma amostra de lubrificante representativa do sistema de lubrificação deve-se procurar a concretização dos seguintes requisitos [7]:

- A amostra deverá ser retirada sempre do mesmo ponto da máquina onde exista uma boa circulação do lubrificante e de preferência antes do filtro, pois as partículas maiores, que são retidas no filtro, possuem informações importantes sobre a deterioração da própria máquina;
- A amostra deverá ser recolhida com a máquina em funcionamento e sempre dentro das mesmas condições de funcionamento; a concentração de partículas de desgaste num óleo lubrificante varia segundo as condições de funcionamento (carga velocidade, etc.);
- Se a amostra for obtida após a máquina ter parado, esta deverá ser retirada o mais rápido possível após a sua paragem, mas tendo sempre em consideração o tempo de sedimentação das partículas de desgaste;
- A amostra deverá ser retirada para um frasco de vidro transparente (incolor, para possibilitar uma pré – análise visual), perfeitamente limpo e com uma capacidade de pelo menos 1/3 maior que o volume da amostra;
- A amostra deverá ser sempre acompanhada de informação referente ao lubrificante e a própria máquina tais como:
 - identificação da máquina;
 - identificação do lubrificante/fluido;
 - data da amostra;
 - ponto de recolha;
 - horas de serviço;
 - possíveis atestos;
 - informações adicionais fornecidas pelo operador ou responsável da máquina.

4.5. Tratamento Térmico

Após a observação e o registo fotográfico das zonas do ferrograma mais relevantes, procede-se ao tratamento térmico do mesmo a várias temperaturas. O tratamento térmico do ferrograma permite a distinção dos vários metais, nomeadamente, das diferentes ligas de aço (baixa, média e alta liga).

O tratamento térmico é feito utilizando uma placa de aquecimento - CIMAREC 2, e um termómetro de superfície - PTC (Pacific Transducer Corp) e seguindo procedimentos predefinidos. O tratamento térmico a uma dada temperatura, por exemplo 330°C (625°F), permite distinguir partículas ferrosas em três classes de ligas, baixa, media e alta liga de aço (ver Tabela 3).

Tabela 3: Mudança de cor das partículas ferrosas após tratamento térmico[40]

Material	Mudança de cor
Aço de baixa liga	Azul
Aço de média liga	Amarelo/Bronze
Aço de alta liga	Não há mudança de cor

Partículas metálicas não ferrosas, como o alumínio, cromo, prata e titânio, não sofrem qualquer alteração a esta temperatura.

Para aços de alta liga é necessário realizar tratamentos térmicos a temperaturas mais elevadas. A alteração da tonalidade das partículas encontra-se referida na Tabela 4.

Tabela 4: identificação da metalurgia das partículas de desgaste após tratamento térmico [41]

Material de teste	Materiais similares	Cor			
		Test 1 330°C/625°F	Test 2 400°C/750°F	Test 3 480°C/900°F	Test 4 540°C/1000°F
AISI 52100*	Aço carbono e aços de baixa liga	Azul	Cinzento claro		
3-1/2 % Carbono Ferro Fundido	Aços de média, liga cerca de 3-8% de liga	Amarelo palha	Bronze profundo		
Níquel tipo « A » ¥	Alta liga de níquel	Sem alteração	Sem alteração	Bronze sarapintado ¹ significativa na maioria das partículas	Todas as partículas azuis ou azul / cinza
AISI 304E aço inoxidável	Aços de alta liga	Sem alteração	Geralmente Sem alteração; Algumas partículas ficam ligeiramente amarelas	Amarelo palha e algumas partículas sarapintado	A maior parte das partículas mantêm-se amarelo palha e alguns ficam azuis
Materiais orgânicos		Carbonização, contração, vaporização, dependendo do material			

*AISI 52100: 0.98- 1.10% C, 0.25 – 0.45% Mn, 0.025% P max, 0.0025% S max, 0.20 – 0.35% Si, 1.30 – 1.60% CR

¥ Nickel (comercial) : 99% puro

£ AISI 304 :0.08% C max, 2.00% Mn max, 1.00% Si max, 18.00 – 20% Cr, 8.00 – 10.50% Ni

4.6. Procedimentos experimentais

4.6.1. Ferrografia de Leitura Directa (DR III)

Neste ensaio cerca de 1 ml de amostra circula através de um tubo capilar, o qual está submetido a um forte campo magnético e dois feixes luminosos. As partículas contaminantes vão-se depositar ao longo do tubo capilar, atraídas pelo campo magnético ou por sedimentação. As partículas de maiores dimensões (>5µm) depositam-se primeiro, seguindo-se partículas menores (<5µm). A densidade do depósito é medida por um sistema óptico, o qual quantifica a intensidade de luz que atravessa o



Figura 43: Ferrografia de Leitura Directa (DR III)

¹ Com pintas de várias cores. = pintalgado

tubo em dois locais previamente definidos, e que é inversamente proporcional à densidade de partículas depositadas.

Para a realização desta análise são necessários os seguintes elementos:

- forno elétrico para aquecimento da amostra;
- pipetas e tubos de ensaio;
- solvente para a preparação da amostra (tetracloro de etileno);
- tubo de plástico DR III (consumível).

O procedimento para a execução de uma Ferrografia de Leitura Directa – DRIII é o seguinte:

- equipamento deve estar ligado 30 minutos antes de se iniciar o ensaio;
- óleo deve ser aquecido num forno a 65°C durante 30 minutos;
- agitar a amostra a analisar, para uma boa homogeneização das partículas no óleo;
- a seguir preparar 1ml da amostra do óleo a analisar num tubo de ensaio e adicionar no mesmo tubo 1ml de solvente (tetra cloro de etileno);
- misturar o óleo da amostra com o solvente no tubo de ensaio;
- colocar o tubo de ensaio num dos suportes na máquina de ensaio (ver figura 4), para efectuar a passagem de todo o óleo no tubo;
- registar os valores de “DI” e “Ds”, que representam respectivamente as quantidades de partículas grandes e partículas pequenas;
- calcular dois índices de desgaste (CPUC e ISUC).

4.6.2. Ferrografia Analítica

O ensaio é realizado segundo os mesmos princípios do que na Ferrografia de Leitura Directa, mas neste caso as partículas são depositadas e fixadas sobre uma lâmina de vidro.

Para a realização desta análise são necessários os seguintes elementos:

- forno elétrico para aquecimento da amostra;
- pipetas e tubos de ensaio;
- solvente para a preparação da amostra;
- tubo de plástico FM III e lamela de vidro;
- microscópio óptico com câmara fotográfica;

- Placa térmica, cromómetro e termómetro de superfície.

A descrição dos procedimentos para a análise de lubrificantes por ferrografia analítica é dividida em duas fases principais:

- Preparação do ferrograma;
- Análise microscópica do ferrograma.

Preparação do ferrograma

- Ligar o FM III pelo menos 5 minutos antes de iniciar o ensaio;
- A amostra de óleo deve ser aquecida num forno a 65°C durante 30 minutos;
- Agitar a amostra a analisar, para uma boa homogeneização das partículas no óleo;
- Retirar 1 ml de solvente para um tubo de ensaio;
- Adicionar para esse mesmo tubo 3 ml da amostra de óleo;
- Misturar bem essas duas soluções;
- Coloque o tubo de ensaio no suporte e encaixe-o na cabeça existente, empurrando cuidadosamente de modo a não o partir;
- Afaste para o lado de fora o braço/sensor;
- Introduza o tubo de plástico no orifício existente no suporte, de modo a que a extremidade que contém um corte toque no fundo do tubo;
- Introduza a outra extremidade do tubo no orifício do braço/sensor até tocar na superfície que cobre o sistema magnético. Assim, quando posicionar o braço/sensor para iniciar o teste, a altura a que se encontra o tubo de plástico da lamela, será a apropriada;
- Retire uma lamela do envelope protetor e identifique-a;
- Segurando a lamela pelas suas extremidades, coloque-a sobre o campo magnético de modo à sua entrada ficar localizada no início da linha magnética marcada (a parte de saída da lamela é definida por um ponto preto, que deverá ficar localizado no lado esquerdo);
- Carregando no suporte da lamela baixe-o de modo a esta ficar posicionada para o teste;
- Rode o botão de vedação no sentido dos ponteiros do relógio;
- Coloque o braço/sensor sobre a lamela e centre-o;
- Pressione o botão do ciclo Automático ou Semi-automático;
- Cuidadosamente puxe o suporte da lamela para cima;
- Retire o ferrograma na direcção vertical;

- Coloque o ferrograma dentro do seu envelope protetor e identifique-o;
- Retire o tubo de plástico e o tubo de ensaio do FM III.

ANÁLISE MICROSCÓPICA DO FERROGRAMA

Utilizando o microscópio bicromático, FERROSCOPE IV CH-2, procede-se à análise do ferrograma. O uso do microscópio conforme referido permite observar as várias características das partículas. Algumas destas características estão associadas aos diversos tipos de desgaste e outras à identificação do material que está a ser desgastado Figura 44.



Figura 44: microscópio bicromático-Olympus

Procedimentos

Após ter ligado o microscópio, coloca-se cuidadosamente o ferrograma sobre a placa de vidro, tendo em atenção que o ponto negro marcado no ferrograma fique situado no canto inferior esquerdo.

Com uma ampliação total de 200X e 1000X, com uma luz reflectida de cor branca e uma luz transmitida de cor verde, é possível observar várias partículas, ferrosas, não ferrosas, partículas não metálicas, como polímeros, areias, poeiras, etc.

O uso da luz polarizada é útil para identificar partículas não metálicas que quando observadas, com esta iluminação emitem brilho e diferenciam-se das partículas metálicas (surgem escuras).

4.6.3. Microfotografia

A microfotografia pode ser realizada através de uma câmara fotográfica de filme ou de uma câmara de aquisição de imagem para processamento digital.

Utilizando a câmara de aquisição de imagem – NC-8 CCD COLOR CAMARA, que é montada no microscópio, o ferrograma poderá ser fotografado digitalmente.

Para visualização do ferrograma e aquisição da imagem usar o software PCTV Vision;

4.7. Conclusão

A Ferrografia é uma técnica que permite a monitorização e diagnóstico do estado de condições de máquinas [33].

Com a Ferrografia de Leitura Directa obtém-se os Índices de partículas grandes de desgaste (DL) e de partículas pequenas de desgaste (DS). Com estes, calcula-se os índices de concentração de Partículas de Desgaste (CPUC), de Severidade de Desgaste (ISUC) e da Percentagem de Partículas Grandes (PLP) [34]. Esses índices são importantes porque permitem construir uma curva de tendência da evolução de desgaste de um determinado equipamento, e alertar o pessoal de manutenção para uma determinada tendência de desgaste anormal.

Na Ferrografia Analítica as partículas são depositadas sobre um substrato de vidro denominada de ferrograma e a fase analítica é realizada utilizando um microscópio bicromático que permite distinguir o tamanho, forma, composição e condição da superfície das partículas de metais ferrosas e não ferrosos.

O tratamento térmico do ferrograma normalmente é feito a seguir ao registo fotográfico e é muito importante porque permite a distinção dos vários metais, nomeadamente, das diferentes ligas de aço (baixa, média e alta liga).

A análise da Ferrometria e da Ferrografia, devem ser realizadas por um especialista na técnica, caso contrário podem ocorrer erros na interpretação dos resultados.

5. Base de Dados

5.1 Criação de Base de Dados

A criação desta base de dados surgiu em resultado da existência de um elevado volume de informação e de registos fotográficos sobre partículas de desgaste de rolamentos e assim disponibilizar um conjunto de informações úteis e facilitar o seu acesso. Esta base de dados encontra-se dividida em vários campos para simplificar o processamento dos dados existentes e para acrescentar dados novos ou modificar os já existentes.

A Figura 45 representa a estrutura básica desta base de dados, pode-se dizer que estes são os principais campos que permitem navegar e ter acesso a todos os conteúdos disponíveis.

Observa-se a partir desta página a possibilidade de entrar em vários campos de consulta do que é constituído esta base, assim como, realizar pesquisa sobre o tipo de desgaste, o tipo da máquina, tipos de óleos e por ultimo pode-se criar um relatório com toda a informação disponível.

A pesquisa pelo tipo de máquina é limitada uma vez que a máquina usada é a mesma para todos os casos.



Figura 45: Pagina principal da base de dados

De uma forma resumida esta base de dados funciona da seguinte forma:

O primeiro formulário é constituído por vários campos onde se pode colocar diferentes informações, como de identificação, referências, tipos de óleos, entre outros.

A Figura 46 demonstra como é o primeiro formulário.

ID - Campo de identificação (ID), identifica cada tipo de amostra, este valor é atribuído aleatoriamente à medida que os dados são introduzidos.

Máquina – local para identificar onde é proveniente a amostras, contém um script com várias opções disponíveis ou mesmo espaço para editar um novo nome.

ID	<input type="text" value="(Novo)"/>	Diluição	<input type="text"/>
Máquina	<input type="text" value="Sistema Hidráulico"/>	Data	<input type="text"/>
Equipamento	Sistema Hidráulico	CPUC	<input type="text"/>
Referência	Sistema Térmico	ISUC	<input type="text"/>
Óleo	Compressor		
Horas Máquina	Bomba		
Horas Óleo	Turbina		
DL	Caixa de Engrenagens		
DS	Motor		
	Ensaio Rolamentos		
	Ensaio FZG		
	Ensaio Banco		
	Ensaio Pino/Disco		
	Outros		

Figura 46: Formulário (dados referentes a amostra e equipamentos)

Equipamento – Local onde existe o nome dos equipamentos (rolamentos) analisados, contém um script com os diferentes rolamentos estudados e com espaço para poder acrescentar mais.

Referência – Local onde se identifica e referência da amostra do lubrificante utilizado.

Óleo – Tipo de óleo utilizado.

Horas de máquina – Tempo que a máquina teve em funcionamento.

Horas de óleo – Tempo de serviço do óleo.

DL – Índice de Partículas Grandes.

DS – Índice de Partículas Pequenas.

Diluição - Factor de diluição da amostra.

Data - Data em que o ensaio foi realizado.

CPUC – Índice de Concentração de Partículas de Desgaste.

ISUC - Índice de Severidade do Desgaste.

Os valores DL e DS são obtidos após a análise da amostra por Ferrometria e ao introduzir os valores de partículas grandes (DL), os de partículas pequenas (DS) e o valor da diluição, a base de dados calcula automaticamente os Índice de Concentração de Partículas de Desgaste (CPUC) e de Severidade do Desgaste (ISUC) como se observa. A Figura 47, apresenta um exemplo da amostra do lubrificante Ester ISO VG 320, representado como caso ID 1. Para mais detalhes sobre o cálculo de CPUC e ISUC (ver ponto 4.2.).

Fotografia - local que permite importar as microfotografias para a base de dados. Estas têm que estar no formato bmp caso contrário não se consegue realizar a importação.

Após todos estes registos e importações de dados, o próprio programa vai realizar uma organização de informação, formando um relatório com a apresentação da partícula analisada e todos os dados revelantes para o seu estudo, com uma particularidade de apresentar as fotografias das mesmas. Pode-se verificar na Figura 50, um exemplo da representação do relatório referido.

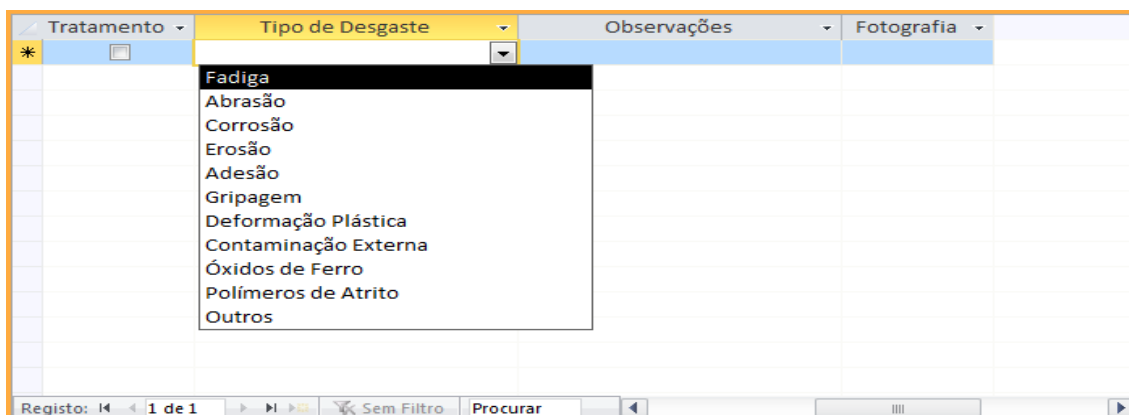


Figura 49: Continuação do formulário 3

ID	1	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	Ester ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Rolos (rodagem)	Horas Óleo	2	Data	09-03-2011
	Diluição	1,000	DL 96,7 DS	39,9	CPUC 1,4E+02	ISUC	7,8E+03
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico			
25	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>			
		Tipo de Desgaste: Fadiga					
Observações							
Ampliação da Fotografia ID_foto 21. Partícula ferrosa de grande dimensão e outras de menores dimensões.							
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico			
26	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input checked="" type="checkbox"/>			
		Tipo de Desgaste: Fadiga					
Observações							
Aspecto da partícula da fotografia ID_25 após Tratamento Térmico. A alteração de tonalidade para azul, indica tratar-se de uma partícula de aço de baixa liga.							
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico			
27	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>			
		Tipo de Desgaste: Outros					
Observações							
Ampliação da Fotografia ID_foto 21. Partículas ferrosas de desgaste de grandes e médias dimensões.							
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico			
28	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input checked="" type="checkbox"/>			
		Tipo de Desgaste: Outros					
Observações							
Aspecto das partículas da Fotografia anterior após Tratamento Térmico. A alteração de tonalidade para azul, indica tratar-se de uma partícula de aço de baixa liga.							

Figura 50: Relatório gerada pela base de dados

Em anexo encontram-se todos os casos inseridos na base de dados.

5.2 Consultar a Base de Dados

Como referido anteriormente a pesquisa pode ser realizada de várias formas. Neste trabalho foram realizados duas formas de pesquisa, pesquisa pelo tipo de desgaste e pesquisa pelo tipo de óleo.

Pesquisa por tipo de desgaste:

Desgaste

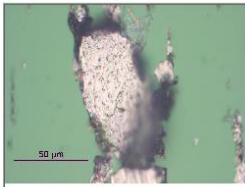
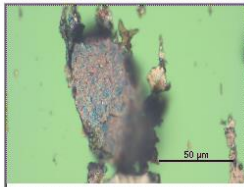
<p>Gripagem ▼</p>			
ID	<input type="text" value="50"/>	Observações	<input type="text" value="Partícula ferrosa de grande dimensão e de alguns óxidos."/>
Máquina	<input type="text" value="Ensaio Rolamentos"/>	Observações	<input type="text" value="Aspecto da partícula da fotografia ID_45 após Tratamento Térmico. A"/>
Equipamento	<input type="text" value="Ensaio"/>	Fotografia	
Referência	<input type="text" value="Rolamentos Axiais de Rolos"/>	Fotografia	
Óleo	<input type="text" value="Ester ISO VG 320"/>	ID_foto	<input type="text" value="45"/>
Horas Máquina	<input type="text"/>	Ampliação	<input type="text" value="1000"/>
Horas Óleo	<input type="text" value="48"/>	Localização	<input type="text" value="Núcleo"/>
DL	<input type="text" value="96,7"/>	Luz	<input type="text" value="Verde / Branca"/>
DS	<input type="text" value="39,9"/>		
Diluição	<input type="text" value="1,000"/>		
Data	<input type="text" value="09-03-2011"/>		
CPUC	<input type="text" value="1,4E+02"/>		
ISUC	<input type="text" value="7,8E+03"/>		

Figura 51: Gripagem em rolamentos axiais de rolos óleo Ester 320

No exemplo representado na Figura 51 optou-se por fazer uma pesquisa pelo tipo de desgaste (gripagem), toda a informação foi gerada automaticamente, onde se identifica como o desgaste da gripagem em rolamentos axiais de rolos, usando um lubrificante (Ester 320). Essas partículas são de gripagem porque têm características de partículas de fadiga com marcas de adesão e deformação plástica.

Gripagem ▼

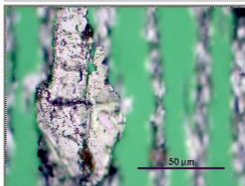
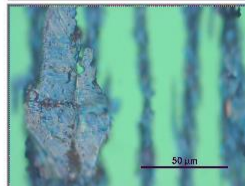
ID	<input type="text" value="29"/>	Observações	<input type="text" value="Ampliação da Fotografia ID_foto 131. Partícula ferrosa de grande"/>
Máquina	<input type="text" value="Ensaio Rolamentos"/>	Observações	<input type="text" value="Aspecto da partícula ID_foto 134 após Tratamento Térmico. A"/>
Equipamento	<input type="text" value="Ensaio"/>	Fotografia	
Referência	<input type="text" value="Rolamentos Axiais de Rolos Rodagem"/>	Fotografia	
Óleo	<input type="text" value="PAO ISO VG 320"/>	ID_foto	<input type="text" value="134"/>
Horas Máquina	<input type="text"/>	Ampliação	<input type="text" value="1000"/>
Horas Óleo	<input type="text" value="12"/>	Localização	<input type="text" value="Núcleo"/>
DL	<input type="text" value="98,3"/>	Luz	<input type="text" value="Verde / Branca"/>
DS	<input type="text" value="39,7"/>		
Diluição	<input type="text" value="1,000"/>		
Data	<input type="text" value="28-02-2011"/>		
CPUC	<input type="text" value="1,4E+02"/>		
ISUC	<input type="text" value="8,1E+03"/>		

Figura 52: Gripagem em rolamentos axiais de rolos (rodagem) óleo PAO 320

Na Figura 52 o exemplo apresentado é de rolamentos axiais de rolos (rodagem) e a amostra do lubrificante usado foi um (PAO 320). Nota-se que além da informação sobre o tipo de desgaste ou do lubrificante utilizado outras informações estão disponíveis (ver Figura).

Pesquisa por óleo: - Ester 320

oleo						
Óleo	ID Máquina	Equipamento	Referência	Horas Óleo	Data	
Ester ISO VG 320	1	Ensaio Rolament	Ensaio	Rolamentos Axiais de Rolos	2	09-03-2011
Ester ISO VG 320	9	Ensaio Rolament	Ensaio	Rolamentos Axiais de Rolos	48	09-03-2011
Ester ISO VG 320	10	Ensaio Rolament	Ensaio	Rolamentos Axiais de Rolos	50	09-03-2011
Ester ISO VG 320	11	Ensaio Rolament	Ensaio	Rolamentos Axiais de Rolos	50	09-06-2011
Ester ISO VG 320	12	Ensaio Rolament	Ensaio	Rolamentos Axiais de Esfera	50	09-06-2011
Ester ISO VG 320	13	Ensaio Rolament	Ensaio	Rolamentos Axiais de Esfer:	100	09-06-2011
Ester ISO VG 320	14	Ensaio Rolament	Ensaio	Rolamentos Axiais de Esfera	2	04-04-2011
Ester ISO VG 320	16	Ensaio Rolament	Ensaio	Rolamentos Axiais de Esfera	48	04-04-2011

sexta-feira, 1 de Novembro de 2013 Página 1 de 1

Figura 53: Pesquisa pelo tipo de óleo

A Figura 53 apresenta um exemplo da pesquisa pelo tipo de óleo. Ao efetuar a pesquisa, neste caso o óleo escolhido foi o (Ester 320), é disponibilizada um conjunto de informação referente ao óleo, tais como, a identificação da máquina, do equipamento, a referência do óleo e data em o ensaio foi realizada.

5.3 Exemplo de Cálculo

Os rolamentos que constam da base de dados são de dois tipos: rolamentos axiais de rolos cilíndricos (refª SKF 81107 TN) e rolamentos de esferas (refª SKF 51107).

Os rolamentos axiais de rolos cilíndricos o contato é linear entre os cilindros e as pistas, enquanto, nos rolamentos de esferas tipo o contato é pontual entre as esferas e as pistas.

Nas tabelas seguintes encontram-se algumas características dos rolamentos, assim como as condições de ensaio para dois casos lubrificados com o óleo éster ISO VG 320.

Tabela 5: Rolamentos de esfera + referência

	Rx	Ry	<ul style="list-style-type: none"> • O número da esfera é 21 • Rugosidade é igual a 0.1µm. • Referência: SKF 51107
Diâmetro de esfera	3 mm	3 mm	
Raios de curvatura de esfera	∞	-3,38 mm	

Tabela 6: Rolamentos de rolos + referência

Número de rolos	Diâmetro do rolo	Largura	Raio do anel (Rx)	Rugosidade	Pista (Rx)	Referência
20	5mm	5mm	2.5mm	0.1 μ m	∞	SKF 81107 TN

Tabela 7: Característica do óleo Ester ISO VG 320

Viscosidade a 40 °C	Viscosidade a 100 °C	Densidade a 20°C
301,9 [cSt]	30 [cSt]	0,915 [cSt]

Tabela 8: Condições do ensaio

	Carga total	Rotação	Temperatura do óleo	Carga
Rolamentos de rolos	6860 N	1200 Rpm	80°C	343 N
Rolamentos de esfera	7000 N	1200 Rpm	80°C	333 N

Os dados disponibilizados nas tabelas apresentadas permitem calcular vários parâmetros, entre os quais a pressão e a espessura do filme lubrificante.

O cálculo da pressão tem como principal objectivo, mostrar que a pressão de contacto é extremamente elevada no rolamento e nos seus componentes (rolos/esferas), que pode ser uma das causas que provocam avarias nos rolamentos.

O cálculo da espessura de filme serve para identificar o regime em que o componente opera, o regime ideal é aquele em que forma o filme completo, isto é, que separa completamente as superfícies.

O valor do módulo de elasticidade é igual para os dois rolamentos, tratando-se de uma superfície de aço esse valor é aproximadamente 210 Gpa. E o coeficiente de Poisson é igual a 0.3 no dois rolamentos.

Os cálculos foram efetuados de acordo com o formulário apresentado no capítulo 2, todos os cálculos foram feitos recorrendo a uma folha de cálculo de tribologia disponível no laboratório da INEGI.

De seguida serão apresentados os resultados obtidos de alguns parâmetros calculados.

Rolamento de esfera

- Pressão de contacto (P_0) = 2.48 Gpa
- P_m = 1.65 Gpa
- η_0 = 0.0563 Pa.s

- $\alpha = 1.15 \text{ Pa}^{-1}$
- $Z_s = 9.12 \text{ mm}$
- $h_0 = 1.92 \text{ }\mu\text{m}$
- $\Lambda = 1.06$

Rolamento de Rolos

- Pressão de contacto (P_0) = 1.004 Gpa
- $\eta_0 = 4.56 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- $\alpha = 1.24 \text{ Pa}^{-1}$
- $Z_s = 3.42 \text{ mm}$
- $h_0 = 1.96 \text{ }\mu\text{m}$
- $\Lambda = 1.389$

Como se pode observar pelos casos apresentados as pressões de contacto entre os elementos rolantes dos rolamentos são sempre elevadas (tipicamente acima de 1GPa). Dado o excelente acabamento dos elementos, rugosidades muito baixas as condições típicas de lubrificação são entre o regime misto e a lubrificação por filme completo. Pode-se observar ainda que, em condições de funcionamento idênticas, os rolamentos de esferas estão sujeitos a pressões de contato bastante superiores aos rolamentos de rolos, o que era esperado uma vez que se tratam de dois tipos diferentes de contatos (pontuais e lineares, respetivamente).

5.4. Conclusão

Pode-se concluir que a criação desta base de dados foi muito importante, uma vez que nela-se encontram disponíveis diversos tipos de informações úteis, acerca da caracterização de partículas de desgaste em rolamento.

Para aceder a essas informações basta realizar uma pesquisa e essa pode ser feita pelo tipo de desgaste, máquina e óleo.

O cálculo da pressão foi feita unicamente para mostrar que a pressão de contacto no interior do rolamento é extremamente elevada conforme-se pode verificar em cima.

6. Casos de Estudo

6.1 Caso de estudo – Análise de Rolamentos de um Trem de Secagem de Pasta de Papel

De seguida será apresentado um caso de estudo sobre a análise de avarias em três rolamentos cónicos com diferentes estágios de degradação, pertencentes a um trem de secagem de pasta de papel. A análise consistiu na observação microscópica da superfície de alguns rolos dos rolamentos e na análise das partículas de desgaste contidas em duas amostras de massa lubrificante. Procedeu-se também à análise da massa lubrificante nova para averiguação de possível contaminação.

Como se observar na Figura 54, o rolamento (1) apresenta uma deterioração extremamente avançada, exibindo a destruição completa do anel interior, gaiola e de alguns elementos rolantes. O rolamento (2) encontra-se com a gaiola fraturada e com uma degradação avançada dos rolos. No rolamento (3) a degradação não é, aparentemente, tão avançada. Nos rolamentos (1) e (2) foram analisados microscopicamente alguns rolos e do interior do rolamento (3) foi recolhida uma amostra de massa para análise por Ferrografia Analítica.

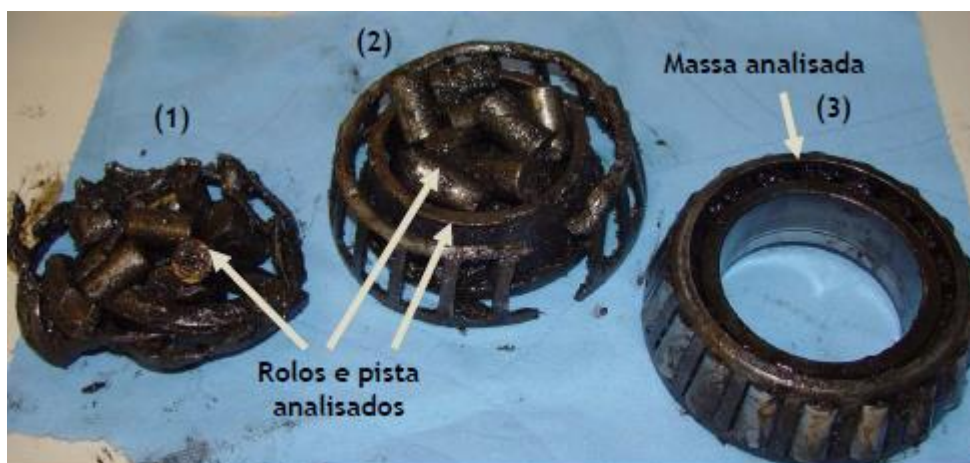


Figura 54: Aspecto geral dos rolamentos cónicos de rolos.

Seguidamente serão apresentados as microfotografias da análise visual do estado da superfície de alguns rolos e pista dos rolamentos (1) e (2), onde se podem identificar os danos predominantes que ocorreram no interior dos rolamentos (ver Figuras 55,56,57,58). Na Figura 58 mostram-se algumas das partículas de desgaste que se encontravam aderidas na superfície dos rolos analisados.

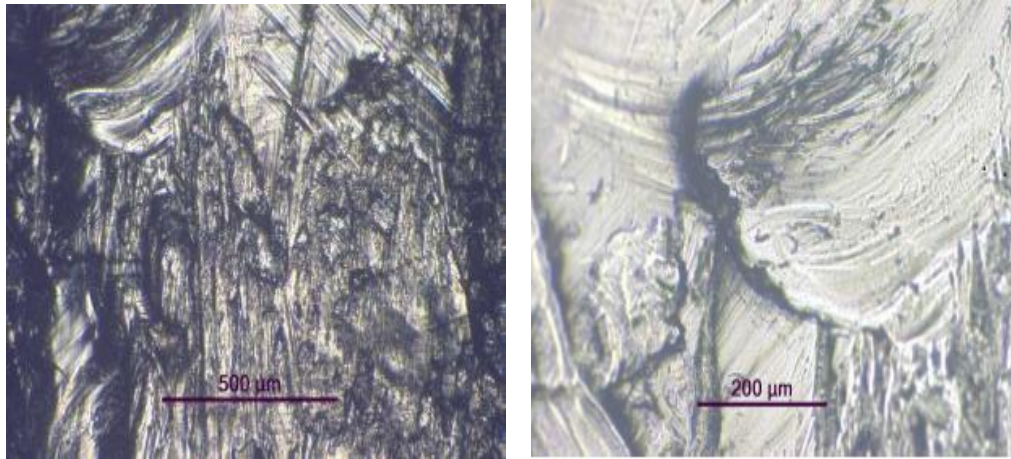


Figura 55: Superfície de um rolo com forte deformação plástica (ampliações de 100x e 200x).

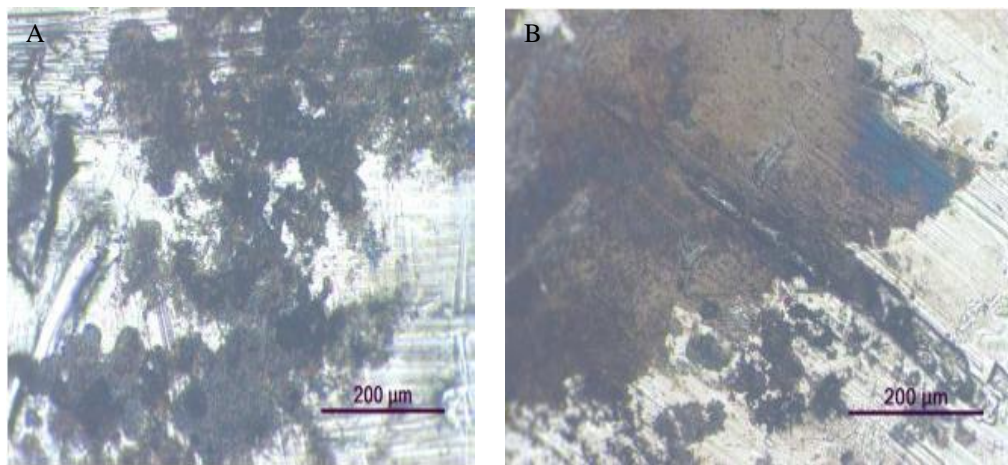


Figura 56: Superfície de dois rolos com desgaste de corrosão electro-química (ampliação 200x).

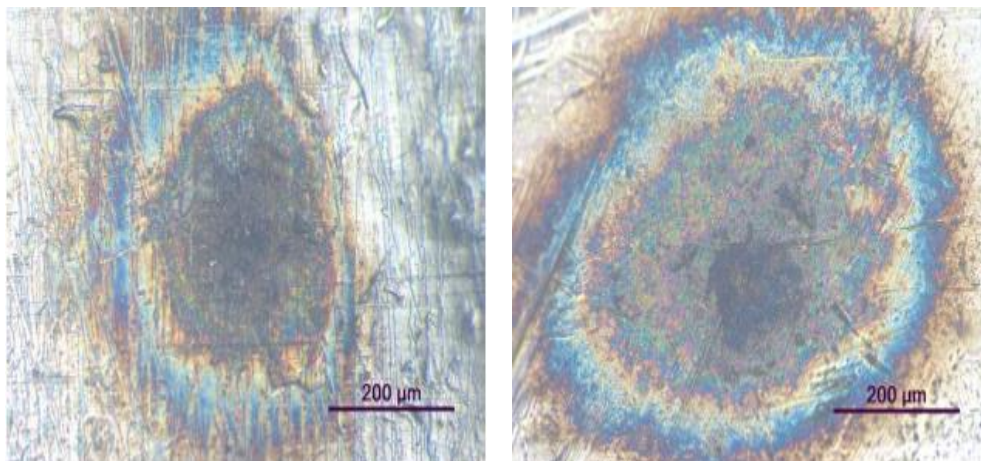


Figura 57: Superfície de dois rolos com picagem por corrosão eléctrica (ampliação 200x)

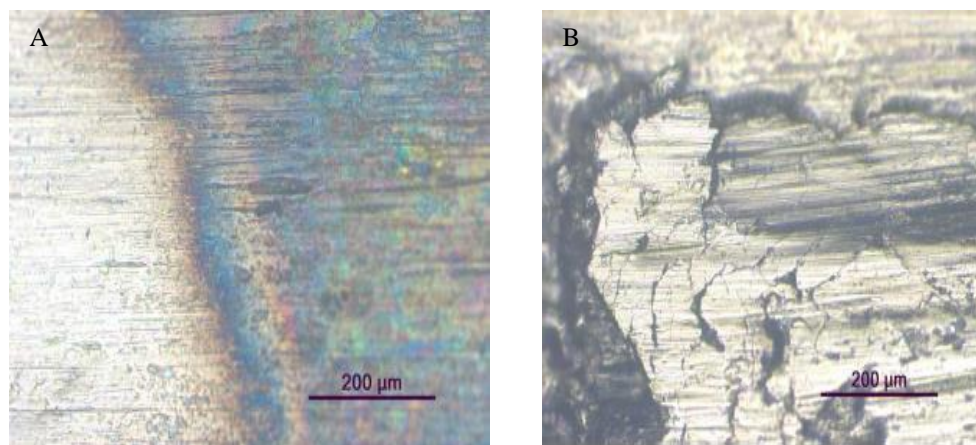


Figura 58: Superfície da pista do rolamento (2) com corrosão e desgaste de fadiga (ampliação 200x).

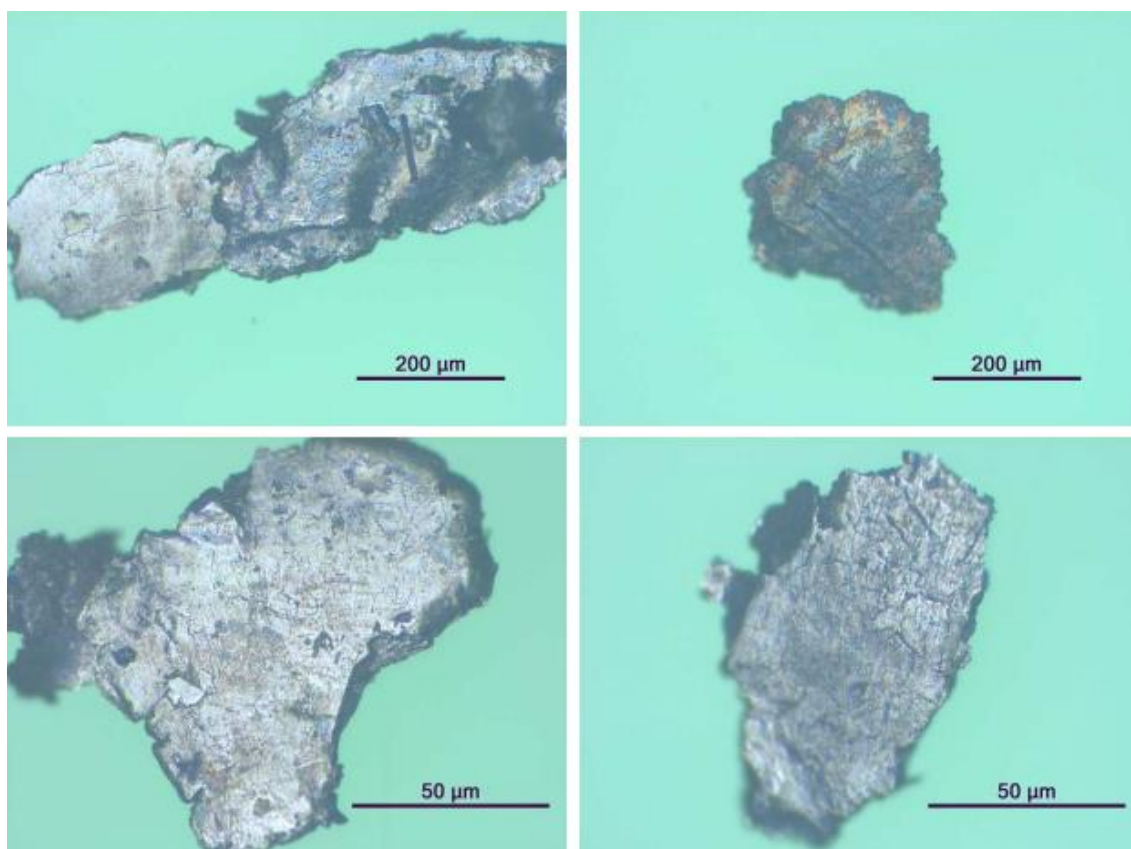


Figura 59: Partículas de desgaste aderidas na superfície dos rolos (ampliações de 200x e 1000x).

Como se pode observar nas microfotografias anteriores, as superfícies dos rolos dos rolamentos mais degradados evidenciam vários tipos de deterioração: deformação plástica, abrasão e corrosão electro-química. No entanto, a deformação plástica e a abrasão a três corpos são os mecanismos que predominam, pois em todos os rolos analisados microscopicamente observam-se fortes evidências do escoamento de material metálico na superfície do rolo (ver Figura 55). A deformação plástica é normalmente provocada pela presença excessiva de partículas que ao serem pressionadas e arrastadas contra as superfícies

provocam um desgaste abrasivo originando dentações e indentações. Essas deformações, quando sujeitas a tensões cíclicas, evoluem para um processo acelerado de fadiga superficial com a geração de fissuras que se propagam em várias direcções e a consequente libertação de partículas de desgaste das superfícies (ver Figura 58 (B)).

Um outro mecanismo de desgaste observado em vários rolos foi a corrosão electro química. Na Figura 56 (A) pode-se observar a degradação da superfície por uma corrosão química (presença de água ou composto ácido), enquanto na microfotografia 56 (B) o dano na superfície é típico de uma corrosão por corrente eléctrica. Na Figura 57 apresenta-se um outro tipo de dano por corrosão que sugere a presença de descargas eléctricas no interior do rolamento, provocando uma picagem na superfície metálica, onde se atingem elevadas temperaturas, conforme é evidenciado pela coloração azul/violeta. A Figura 58 (A) mostra novamente evidências de elevadas temperaturas superficiais, mas neste caso na pista interior do rolamento (2). Verifica-se também a presença de um desgaste severo por fadiga superficial (ver Figura 58 (B)). Os rolos analisados encontravam-se com uma elevada concentração de partículas de desgaste, que mesmo após a sua lavagem com solvente em ultrasons, continuaram aderidas às superfícies. Como se pode observar na Figura 59, algumas dessas partículas que foram recolhidas, mostram evidências de um desgaste muito severo. São partículas típicas de desgaste de fadiga, de grandes dimensões e com uma coloração resultante de altas temperaturas.

6.1.1. Análise de Partículas de Desgaste

Para uma análise mais detalhada da deterioração do rolamento procedeu-se à análise por Ferrografia Analítica de três amostras de massa lubrificante:

Amostra 1 – massa nova;

Amostra 2 – massa retirada do interior do rolamento (3);

Amostra 3 – massa retirada da amostra enviada separadamente;

As amostras de massa analisadas foram preparadas segundo um procedimento de dissolução definido, usando exatamente as mesmas quantidades de massa e de solvente. Na Figura 53, 54 e 55 encontram-se algumas das partículas de desgaste observadas ao microscópio óptico, em cada uma das amostras. A análise das partículas permitiu complementar o diagnóstico da deterioração dos rolamentos, fornecendo informações adicionais sobre o desgaste e contaminação presentes. A análise da amostra de massa nova (ver Figura 59) permitiu identificar a presença de algumas partículas metálicas contaminantes, que embora sejam de

pequenas dimensões são sempre prejudiciais a uma boa lubrificação. Uma massa nova deve-se encontrar sempre isenta de qualquer tipo de contaminação. A concentração de partículas presentes nas Amostras 2 e 3 permitem diferenciar a severidade do desgaste presente nos rolamentos. Na Amostra 2 (Figura 60), proveniente do rolamento menos degradado (3), a presença de algumas partículas ferrosas típicas de desgaste de fadiga e de grandes dimensões mostram que este rolamento se encontra num processo inicial de fadiga, enquanto na Amostra 3 (Figura 61) as partículas de desgaste presentes são essencialmente partículas ferrosas de pequenas dimensões mas que se apresentam em elevadas concentrações e termicamente oxidadas, em consequência de severas condições de funcionamento.

AMOSTRA 1 – Massa Nova

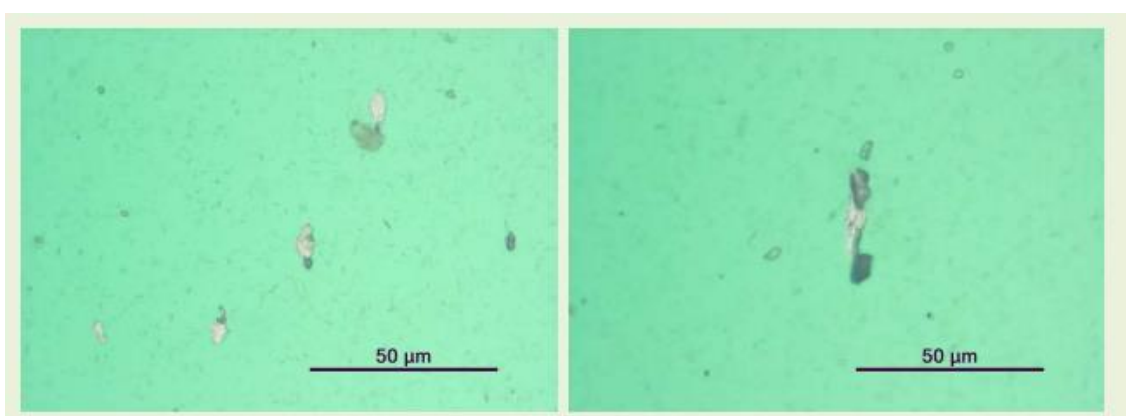


Figura 60: Presença de algumas partículas metálicas de pequenas dimensões (ampliação 200x).

AMOSTRA 2 – Massa retirada do interior do rolamento (3)

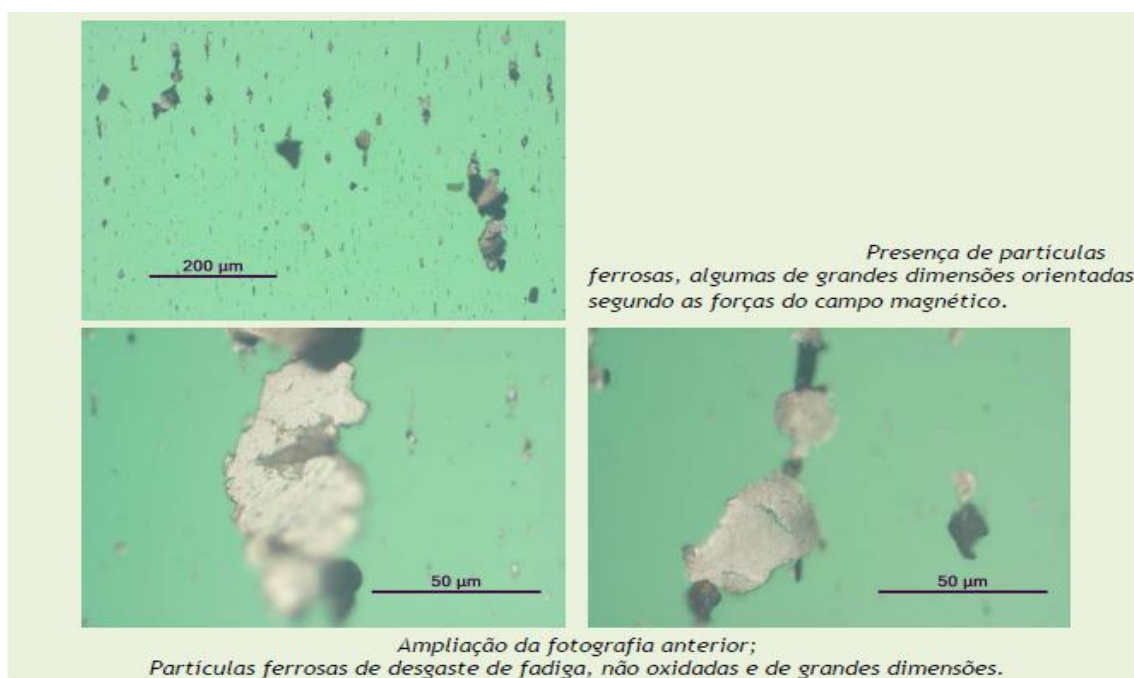


Figura 61: Presença de partículas ferrosas de grandes e pequenas dimensões (200x e 1000x)

AMOSTRA 3 – Massa retirada da amostra enviada separadamente

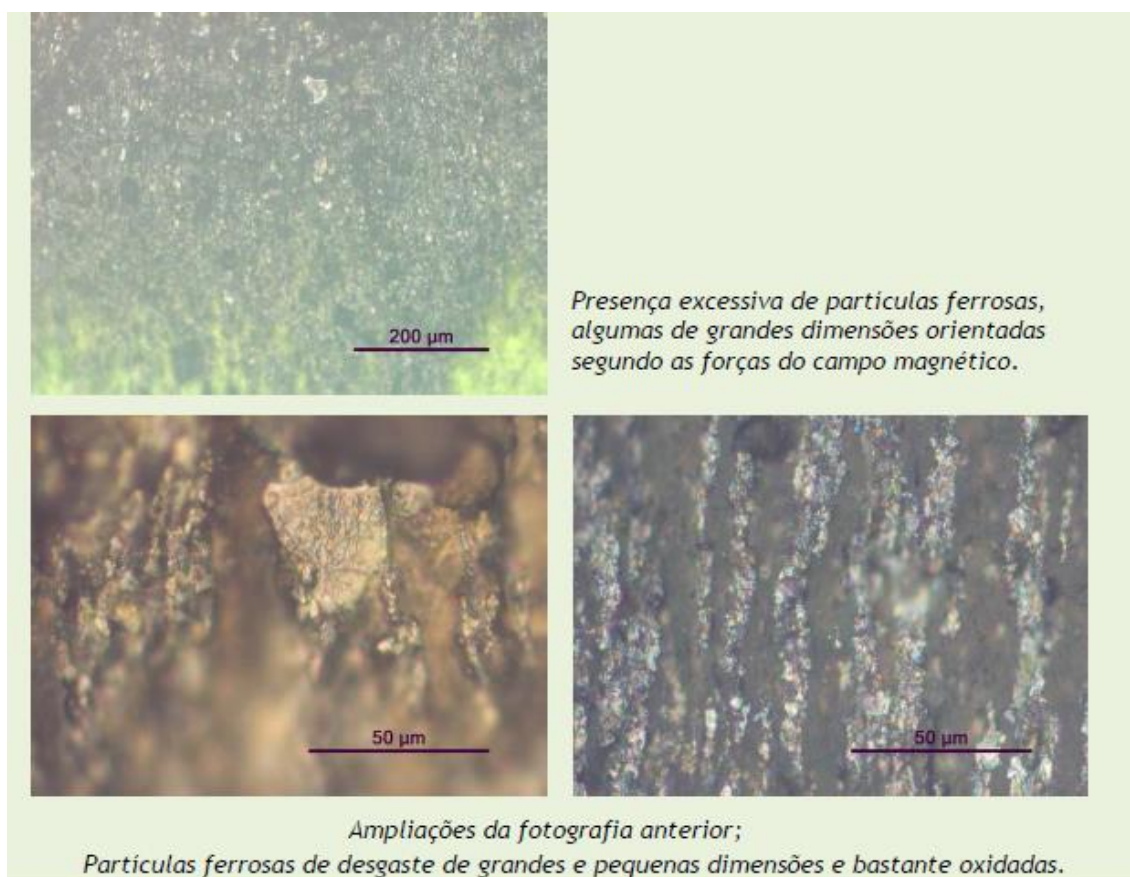


Figura 62: Presença excessiva de partículas ferrosas de grandes e pequenas dimensões e de óxidos térmicos (200x e 1000x)

6.1.2. Discussão

A análise das superfícies de alguns rolos dos rolamentos (1) e (2) e das partículas presentes na massa da Amostra Nº 3 mostra que a presença excessiva de partículas contaminantes no lubrificante (duras, macias, metálicas e não metálicas) é uma das causas predominantes da deterioração tão avançada dos rolamentos. Existem também nas superfícies dos rolos e da pista do rolamento (2), algumas evidências de corrosão electro-química. Recomenda-se a averiguação de possíveis passagens de corrente eléctrica nos rolamentos.

A presença excessiva de partículas contaminantes, para além de alterar as condições de lubrificação, provoca danos severos nas superfícies funcionais dos rolamentos, nomeadamente, um elevado número de indentações. As indentações são provocadas por partículas que entram para o interior do contacto juntamente com o lubrificante, e quando sujeitas ao esmagamento por rolamento dos vários elementos rolantes contra as suas superfícies, originam deformações plásticas no material. As características dessas indentações podem ser diferentes, consoante a forma, tamanho e dureza das partículas contaminantes.

Quando as partículas são duras, as indentações são mais profundas e com rebordos salientes, criando-se condições para um processo de fadiga prematura. Quando as partículas são mais macias, as indentações são de muito pequena profundidade e com reduzida saliência nos rebordos. No caso das partículas contaminantes serem frágeis, gera-se um elevado número de indentações de pequenas dimensões e com rebordos salientes.

A análise da massa retirada do interior do rolamento (3), Amostra Nº 2, permite identificar a presença de um desgaste de fadiga ainda numa fase inicial. A concentração de partículas ferrosas de grandes dimensões ainda não é significativa para classificar o desgaste deste rolamento como severo.

Com a análise da massa nova verificou-se que existe alguma contaminação por partículas metálicas (ferrosas e não ferrosas). Identificou-se também à vista desarmada, a presença de algumas lascas de madeira de grandes dimensões. Recomenda-se assim, a averiguação das condições e cuidados no armazenamento e manuseamento desta massa lubrificante para que as relubrificações dos rolamentos em serviços sejam feitas com massa lubrificante isenta de qualquer fonte de contaminação.

6.2. Segundo caso de estudo

6.2.1. Rolamento principal das pás da turbina de um aerogerador

Este estudo apresenta a análise de uma amostra de massa lubrificante proveniente do rolamento principal das pás da turbina de um aerogerador, para avaliação do desgaste presente.

As análises efectuadas foram as seguintes (ver Tabela 3).

Tabela 9: Amostras efetuadas

Amostra Nº	1
Análises efectuadas:	
• Ferrometria	X
• Ferrografia Analítica	X

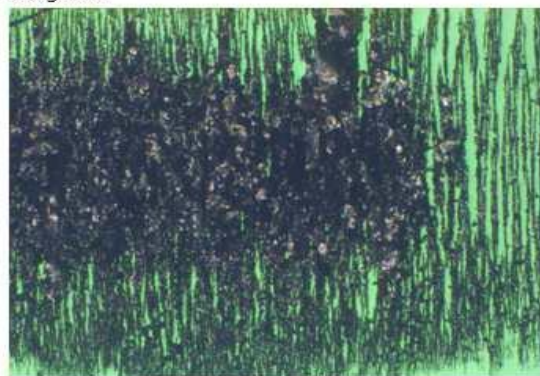
De seguida são apresentados os resultados referentes às análises de Ferrometria (DR III) e Ferrografia Analítica (FM III). Começando pela análise de Ferrometria, os índices de desgaste resultantes encontram-se na Tabela 10. Dada a elevada concentração de partículas de desgaste, a amostra preparada foi diluída numa relação de 1:10.

Tabela 10: Índices de desgaste da amostra

Factor de diluição	DI	Ds	CPUC	ISUC
0.1	72.5	15.6	881.0	50128.9

Os resultados da análise da Ferrografia Analítica

Fotografia 1



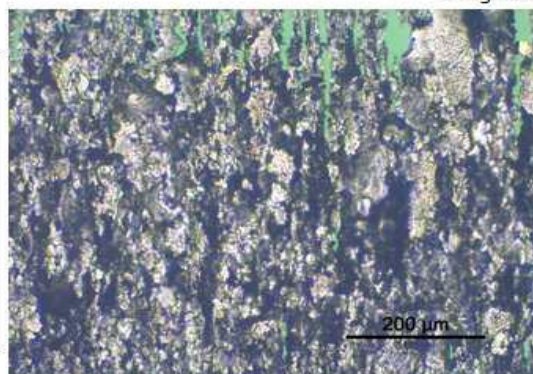
Ampliação: x 100
Diluição: 0,1
Localização: Núcleo
Luz: Branca / Verde

Observações:
- Presença excessiva de partículas ferrosas alinhadas segundo as forças do campo magnético.

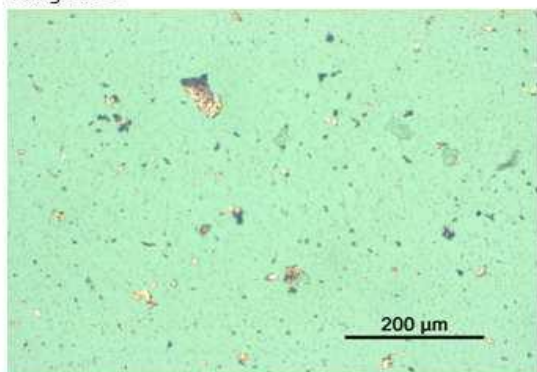
Fotografia 2

Ampliação: x 200
Diluição: 0,1
Localização: Núcleo
Luz: Branca / Verde

Observações:
- Ampliação da Fotografia 1.
Partículas de desgaste ferrosas e com grandes dimensões.



Fotografia 3

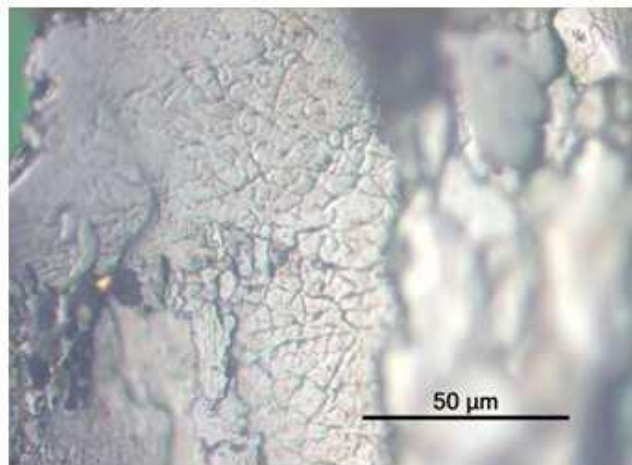


Ampliação: x 200
Diluição: 0,1
Localização: Núcleo
Luz: Branca / Verde

Observações:
- Partículas de desgaste não ferrosas (ligas de cobre) de médias e pequenas dimensões.

Figura 63: Resultados da análise da Ferrografia analítica do rolamento principal das pás da turbina

Fotografia 4



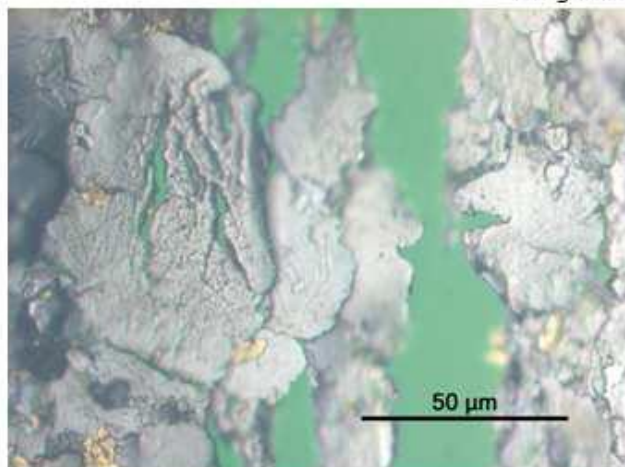
Ampliação: x 1000
 Diluição: 0,1
 Localização: Núcleo
 Luz: Branca / Verde

Observações:
 - Ampliação da Fotografia 2.
 Partícula ferrosa de grandes dimensões, típica de desgaste de fadiga.

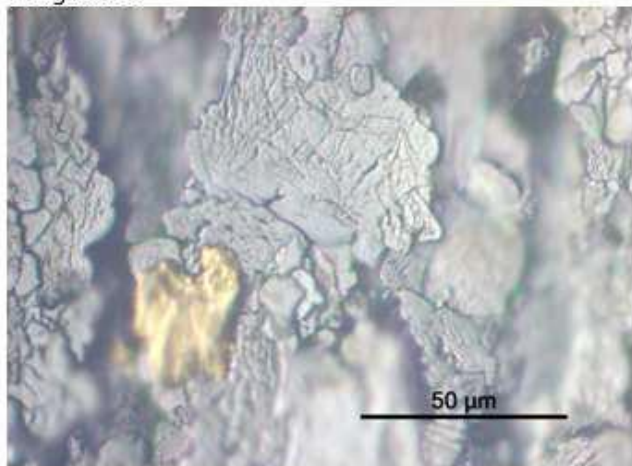
Fotografia 5

Ampliação: x 1000
 Diluição: 0,1
 Localização: Núcleo
 Luz: Branca / Verde

Observações:
 - Ampliação da Fotografia 2.
 Partículas de desgaste ferrosas de grandes dimensões e algumas não ferrosas (liga de cobre) de pequenas dimensões.



Fotografia 6

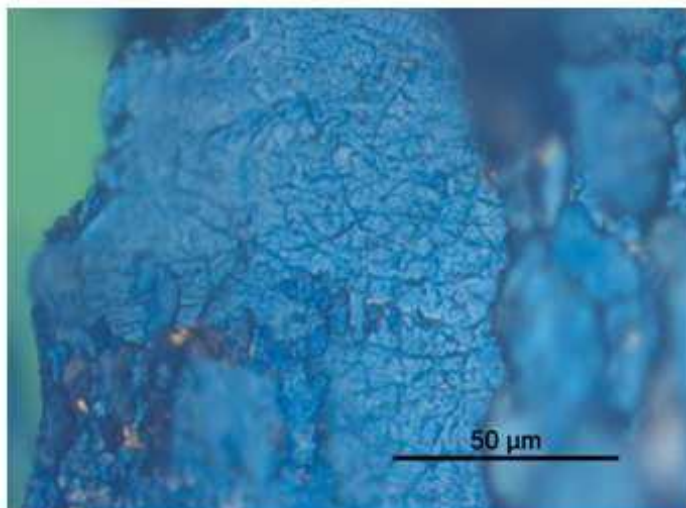


Ampliação: x 1000
 Diluição: 0,1
 Localização: Núcleo
 Luz: Branca / Verde

Observações:
 - Ampliação da Fotografia 2.
 Partículas de desgaste ferrosas de grandes dimensões e uma não ferrosa (liga de cobre) de média dimensão.

Figura 64: Ampliação da microfotografia anterior

Fotografia 7



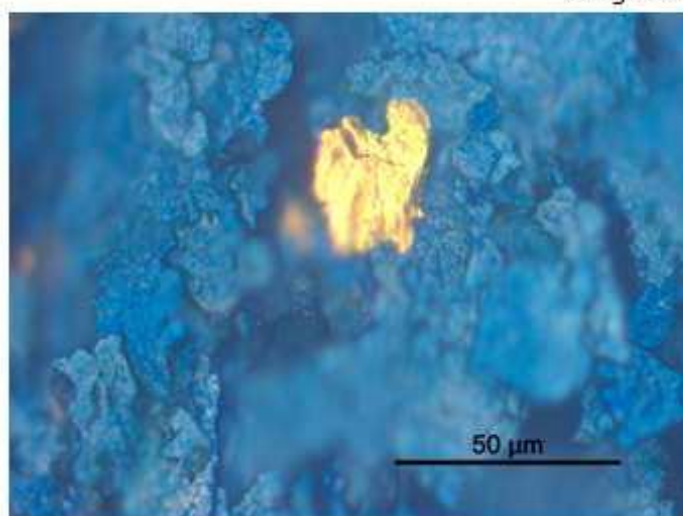
Ampliação: x 1000
 Diluição: 0,1
 Localização: Núcleo
 Luz: Branca / Verde

Observações:
 - Aspecto da partícula da Fotografia 4 após tratamento térmico. A sua tonalidade azul significa que é uma partícula de aço de baixa liga ou aço carbono.

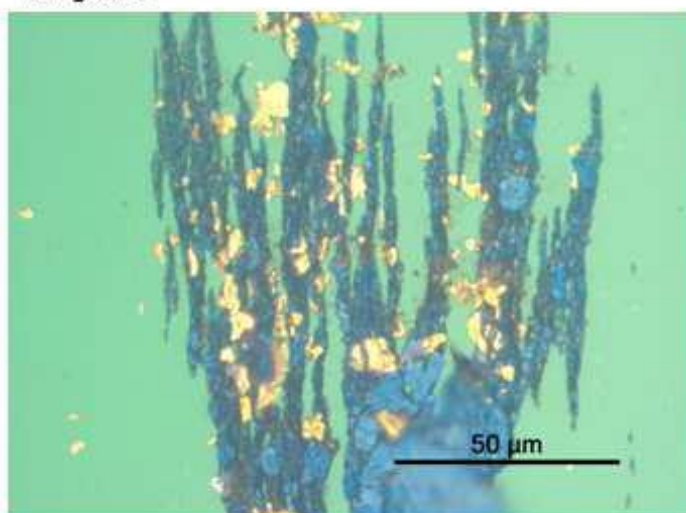
Fotografia 8

Ampliação: x 1000
 Diluição: 0,1
 Localização: Núcleo
 Luz: Branca / Verde

Observações:
 - Aspecto das partículas da Fotografia 6 após tratamento térmico. As suas tonalidade azuis significa que são partículas de aço de baixa liga ou aço carbono. A partícula de liga de cobre manteve a sua tonalidade.



Fotografia 9



Ampliação: x 1000
 Diluição: 0,1
 Localização: Meio
 Luz: Branca / Verde

Observações:
 - Aspecto das partículas de desgaste após tratamento térmico. Note-se a presença significativa de partículas de liga de cobre de pequenas dimensões.

Figura 65: Microfotografias anterior após tratamento térmico

6.2.2. Interpretação dos resultados

Ferrometria (DR III)

Os índices de desgaste (DI, Ds CPUC e ISUC) resultantes da análise ferrométrica da amostra são considerados muito elevados.

Ferrografia Analítica (FM III)

A observação microscópica do ferrograma preparado com a amostra permite verificar o seguinte:

- Presença significativa de partículas ferrosas de desgaste de grandes dimensões (ver Fotografias de 1 a 6). Estas partículas são típicas de um forte desgaste severo;
- Presença significativa de partículas não ferrosas (ligas de cobre) de pequenas dimensões (ver Fotografias 3 e 9).

6.2.3. Considerações finais sobre os resultados

Os resultados obtidos permitem concluir que o lubrificante analisado encontra-se com uma elevada concentração de partículas de desgaste resultantes de um forte desgaste de fadiga em componentes de aço de baixa liga ou aço carbono. As partículas de ligas de cobre surgem também numa concentração significativa mas são praticamente todas de pequenas dimensões. Uma vez que se trata de partículas de um material macio e se encontram juntas com as partículas de aço, leva a que sejam facilmente fragmentadas no contacto com as superfícies do rolamento. Tendo em conta que a amostra analisada foi correctamente recolhida, considera-se que este rolamento sofreu um forte desgaste severo nos seus componentes (gaiola, anéis e elementos rolantes). No entanto, esta análise à massa lubrificante não permite concluir sobre a causa da avaria, nomeadamente se resultou da avaria de fadiga dos corpos rolantes e/ou anéis ou do desgaste excessivo da gaiola. Para tal seria necessária a inspeção e análise do rolamento (corpos rolantes, anéis e gaiola).

7. Conclusões

O trabalho desenvolvido nesta tese contribuiu para aumentar o conhecimento sobre rolamentos, sobre os mecanismos de desgaste e principais tipos de avarias presentes nos rolamentos e adquirir os conhecimentos sobre as técnicas de análise de lubrificantes em serviço por Ferrometria e Ferrografia Analítica.

Em relação ao trabalho de pesquisa bibliográfica:

- Foi efectuada a identificação dos principais tipos de avarias associados aos rolamentos, foram diagnosticadas as causas e apresentadas algumas soluções para minimizar essas avarias.
- Foram abordadas algumas técnicas de análise de avarias e em particular as técnicas de análise de lubrificantes por Ferrometria e Ferrografia Analítica.

Em relação às técnicas a Ferrometria e a Ferrografia Analítica:

- Foram descritas as técnicas, analisados os procedimentos efectuados e ensaios experimentais
- Foram analisados os principais tipos de partículas de desgaste provenientes de rolamentos e foi associada a morfologia das partículas com a avaria predominante e identificadas as causas das avarias.
- Foi criada uma base de dados com informação proveniente dos ensaios de rolamentos, que permite pesquisas rápidas de partículas de desgaste, equipamentos específicos, datas, etc,
- Foram analisados dois casos de estudo, onde mostrou a relevância da utilização da análise de lubrificantes na análise de avarias.

Como trabalho futuro, propoe-se o alargamento do estudo a outros elementos mecânicos nomeadamente engrenagens, turbinas, sistemas hidráulicos e estudo de casos com múltiplos elementos tipo caixas de velocidades/redutores ou motores e completar a base de dados que foi criada com esses elementos.

8. Bibliografia

8.1. Referências Bibliográficas

[1]-Modulform- Formação modular, Inspeção e Montagem de Rolamentos, Guia do formando, 1º Edição, Lisboa, Outubro de 1998

[2]-Alegranzi, S. B., Construção e adequação de uma bancada de ensaios para investigação de técnicas não destrutivas de deteção de danos incipientes em rolamentos, Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, Porto Alegre, Maio de 2012

[3]-Magalhães, L., Texto de apoio às aulas de Tribologia, Instituto Superior de Engenharia do Porto - Departamento de Engenharia Mecânica - Mestrado em Engenharia Mecânica 1ªEdição, Setembro 2011, 2ªEdição, Dezembro 2011.

[4]- Catálogo NTN, Manuseio dos rolamentos

[5]-Catálogo WL 41 520/3 PB, Rolamentos FAG, Rolamentos de esferas · Rolamentos de rolos · Caixas · Acessórios

[6]-Cousseau, T., Análise Comparativa do Comportamento de Massas Mubrificantes num Rolamento Axial de Esferas-Faculdade de Engenharia do Porto, 2009

[7]-J.O. Seabra, Apontamentos da Disciplina: Técnicas de Diagnóstico de avarias, DEM - ISEP, Ano letivo: 2012/2013.- Análise de Lubrificantes MDC 2012 – ISEP

[8]-Granja, L. A., Ferrografia e Espectrometria Aplicadas a Manutenção Preditiva de Turbocompressores, Setor de Lubrificantes (SELUB), Divisão de Tecnologia de Produtos (DIPROD), Centro de Pesquisas (CENPES), Bol. téc. PETROBRAS, Rio de Janeiro, 42 (1/4): 52-63, jan./dez. 1999

[9]-Dalley, R., Lubricant / Wear Particle Analysis, PREDICT, Cleveland, Ohio

[10]-Graça, B. M. M.,COLUNA DE TRIBOLOGIA, Tribologia, Vibrações e Manutenção Industrial

[11]-Catálogo NKS: Rolamentos

[12]-Cousseau, T., Análise Comparativa do Comportamento de Massas Mubrificantes num Rolamento Axial de Esferas, Faculdade de Engenharia do Porto, 2009

- [13]-Artigo Científico, Noria Corporation - Noções Básicas de Lubrificação-Tags: Lubrificantes Industriais
- [14]-Artigo Técnico -Técnicas de Lubrificação ROLAMENTOS-Supreme Lubrificante
- [15]-Catálogo NTN: Lubrificação
- [16]-Jeffers, K., Machinery Management Specialist Bently Nevada Corporation
- [17]-Campos, A. J. V., Determinação da geometria do filme lubrificante da distribuição de pressão e das tensões de corte num contacto Elastohidrodinâmica-Aplicação a rolamentos de rolos -Universidade Do Porto 1994
- [18]-Ferreira, L. A., Tribologia - Notas De Curso – Lubrificação e Lubrificantes
- [19]-Nelson, R., Análise de defeitos mecânicos em Motores Eléctricos, Enquadramento Teórico de Vibrometria e Análise de Rolamentos, Normas aplicáveis, Procedimentos e Descrição do serviço, 21-04-2010
- [20]-Eng. Da Cunha. P.M.R, Previsão de Falha de Rolamentos por Análise Espectral e de Envelope, MSc - Consultor Técnico da Aditeq – Análise e Diagnóstico de Equipamentos Ltda.
- [21]-Catalogo SNS Insduty, Análise e Preconizações para otimizar a vida dos rolamentos
- [22]-Catalogo FAG- Danos nos rolamentos
- [23]-Catálogo : Bearing faults that can be detected with vibration monitoring, Wilcoxon Research Inc. Proprietary. March 2011
- [24]-Catálogo SKF Reliability Systems, Análise de Falhas em Rolamentos
- [25]-Catálogo SNS Insduty, Análise e Preconizações para otimizar a vida dos rolamentos
- [26]-Scoot, R., Basic Wear Modes in Lubricated Systems, Industrial Lubricants, Machinery Lubrication, 7/2008
- [27]-Ding, J., wear debris analysis, oil analysis - Determining Fatigue Wear Using Wear Particle Analysis Tools
- [28]-Fitch, J., Noria Corporation - Tags: wear debris analysis, oil analysis -Practicing Oil Analysis (9/2008)

- [29]-Bezerra, R. A., Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração - Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Departamento de Projeto Mecânico - Campinas, 2004
- [30]-J.O. Seabra, Apontamentos da Disciplina: Técnicas de Diagnóstico de avarias, DEM - ISEP, Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais e Tecnologias de Fabrico, Ano letivo: 2012/2013.- Análise de Vibrações MDC 2012 – ISEP
- [31]-J.O. Seabra, Apontamentos da Disciplina: Técnicas de Diagnóstico de avarias, DEM - ISEP, Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais e Tecnologias de Fabrico, Ano letivo: 2012/2013.- Análise de Emissão de Ultrasons MDC 2012 – ISEP
- [32]-J.O. Seabra, Apontamentos da Disciplina: Técnicas de Diagnóstico de avarias, DEM - ISEP, Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais e Tecnologias de Fabrico, Ano letivo: 2012/2013.- Termografia MDC 2012 – ISEP
- [33]-Dalley, R. J., An overview of ferrography and its use in maintenance
- [34]-Baroni, T. D'A. & Gomes, G. F., A FERROGRAFIA como técnica de manutenção preditiva Estudo de casos
- [35]-Maslach, J. K., Ferrographic Analysis of Grease Lubricated Systems, Analysis of Greases in Roller Bearings, Predict Technologies Cleveland, Ohio
- [36]-Cunha, R. C., Análise do Estado de Conservação de um Redutor de Velocidade Através da Técnica de Partículas de Desgaste no Óleo Lubrificante Auxiliada Pela Análise de Vibrações; Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica; Junho de 2005
- [37]-Smith, M., Oil Analysis Vs. Microscopic Debris Analysis - When And Why To Chosse
- [38]-Dalley, R., Lubricant / Wear Particle Analysis - PREDICT, Cleveland, Ohio
- [39]-Artigo científico: ferrography instrumentation - Trico corporaTion
- [40]-Choi, C., Ferreira, C., pedrosa, R., Laboratório de Lubrificação e Vibrações, Relatórios-FEUP 2005/2006
- [41]-Wear Particle Atlas (revised), Standard Oil, Engineered Materials, Sohio (about 1981).

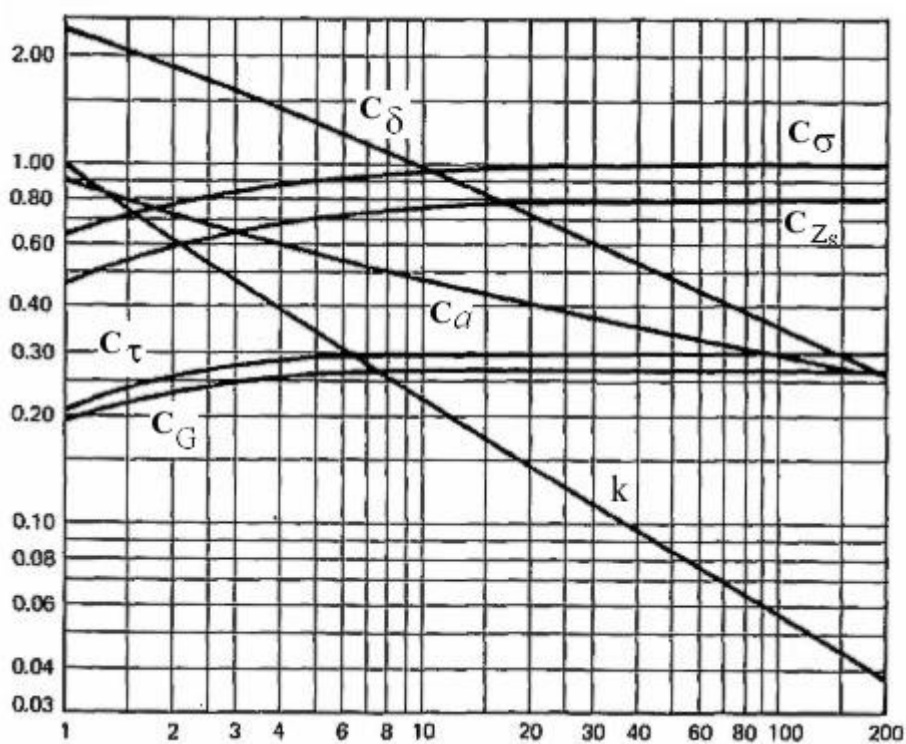
9. Anexos

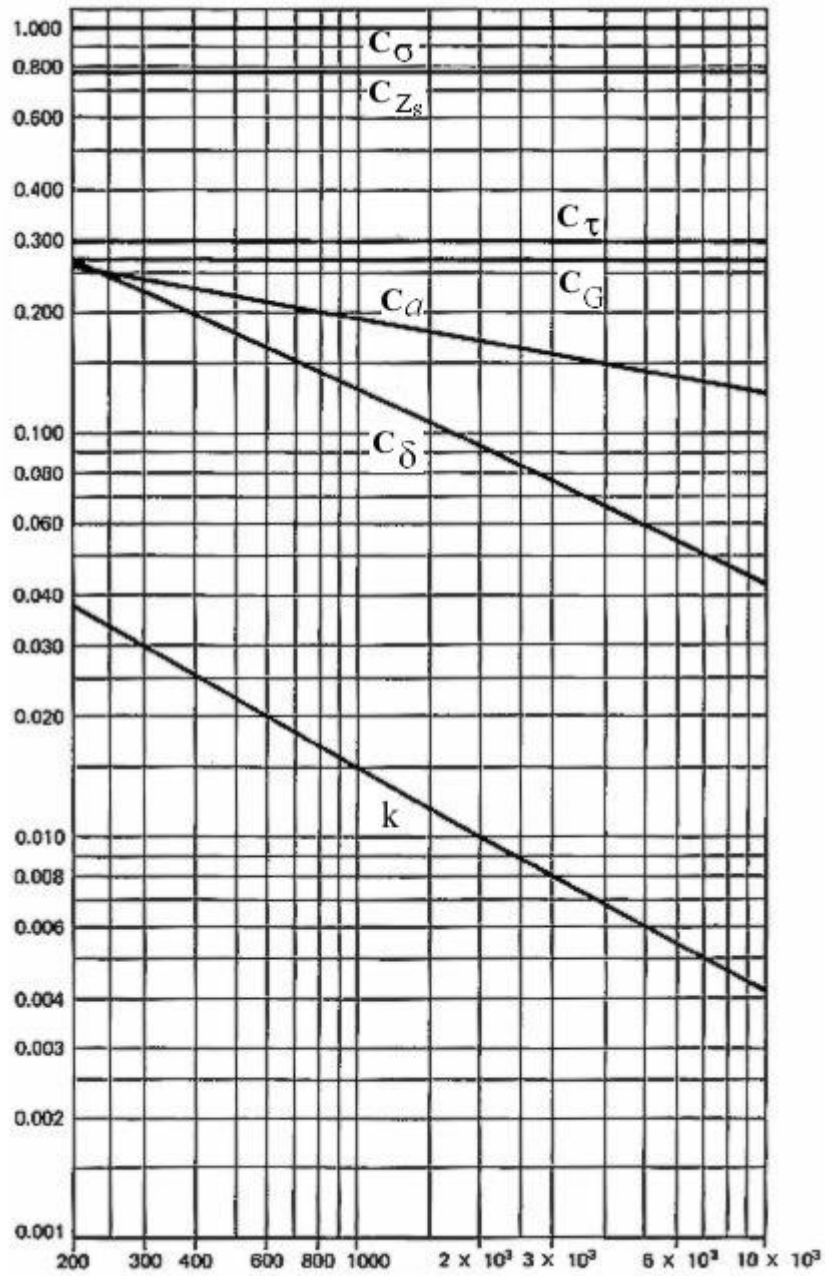
- **Anexo I.** 'Coeficientes adimensionais
- **Anexo II.** 'Base de dados

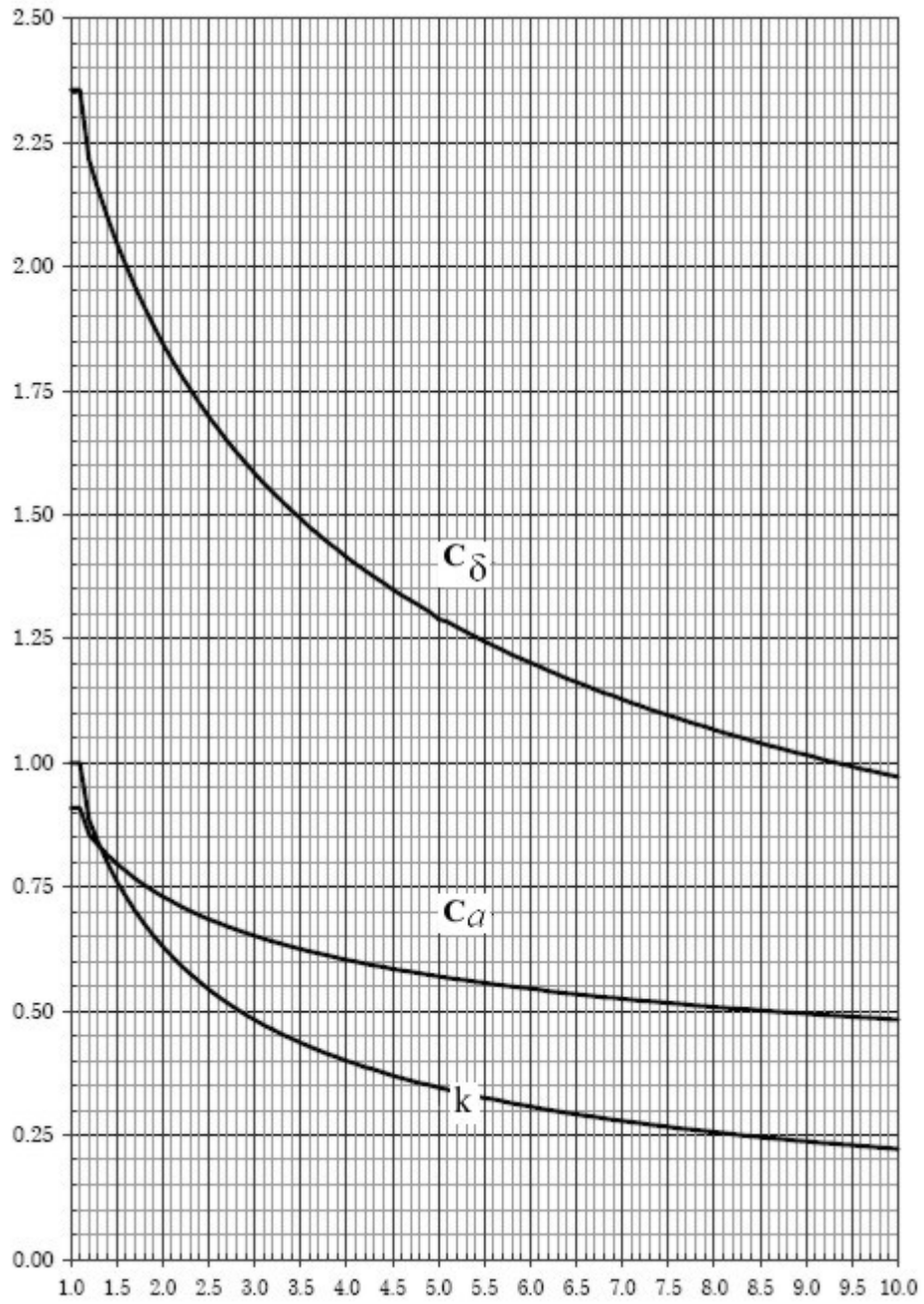
ANEXO I

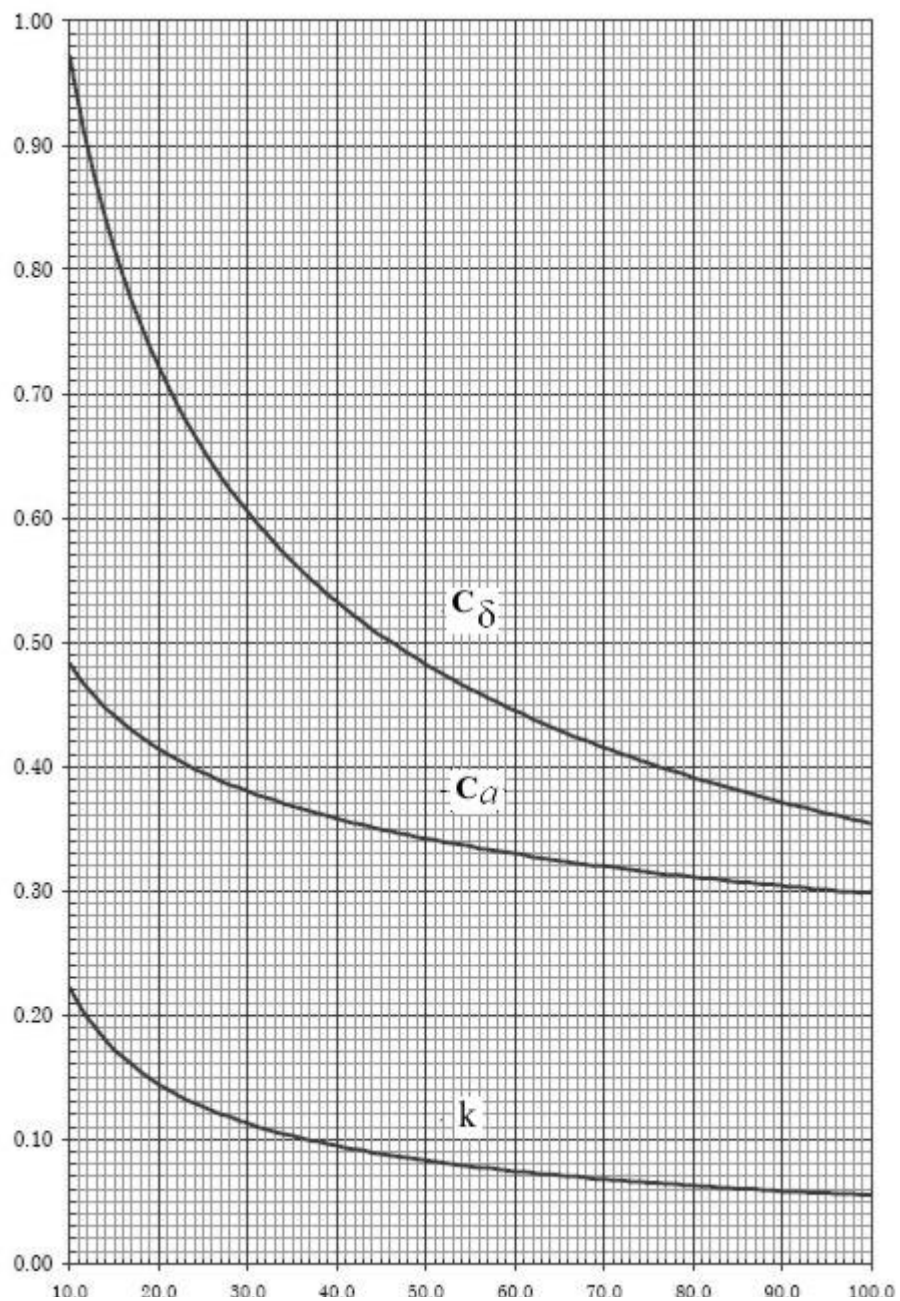
'COEFICIENTES ADIMENSIONAIS

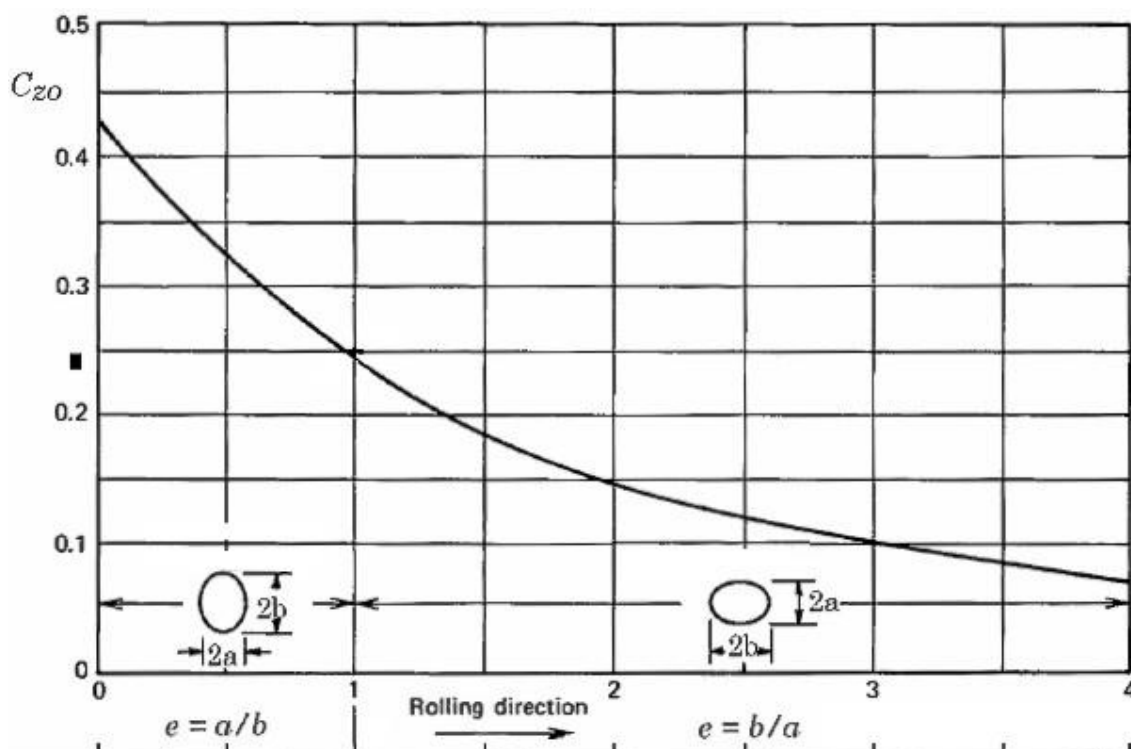
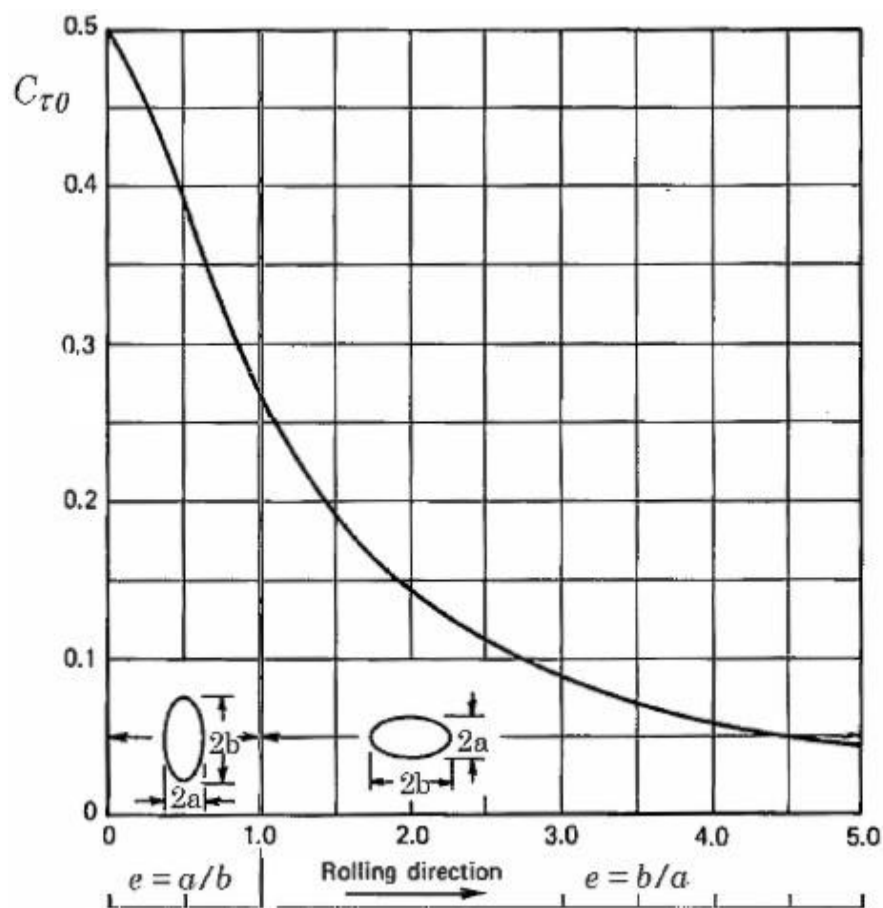
Os gráficos em baixo apresentam os valores dos coeficientes dimensionais, estes permitem calcular vários parâmetros nas pressões de contato e espessura do filme lubrificante.





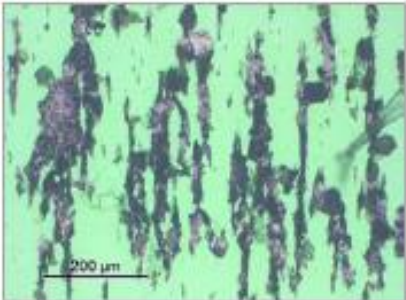
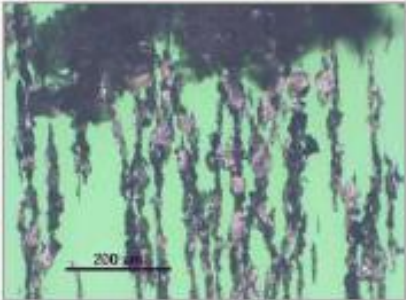

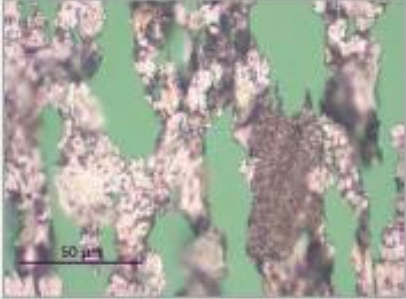






ANEXO II

'BASE DE DADOS

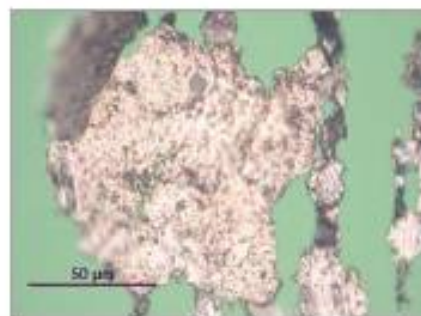
Base dados ferrografia									
ID	1	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina			
Óleo	Ester ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Rolos (rodagem)	Horas Óleo	2	Data	09-03-2011		
Diluição	1,000	DL	96,7	DS	39,9	CPUC	1,4E+02	ISUC	7,8E+03
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico					
21	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	Tipo de Desgaste: <input type="text" value="Outros"/>				
Observações									
Ampliação da Fotografia ID_foto 22. Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.									
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico					
22	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	Tipo de Desgaste: <input type="text" value="Outros"/>				
Observações									
Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões. Presença de um aglomerado de grandes dimensões.									
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico					
23	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	Tipo de Desgaste: <input type="text" value="Outros"/>				
Observações									
Ampliação da Fotografia ID_foto 22. Partículas de pequenas dimensões embebidas numa matrix amorfa de tonalidade negra.									
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico					
24	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	Tipo de Desgaste: <input type="text" value="Outros"/>				
Observações									
Ampliação da Fotografia ID_foto 21. Partículas ferrosas de desgaste de grandes e médias dimensões.									

ID	1	Máquina	<input type="text" value="Ensaio Rolamentos"/>	Equipamento	<input type="text" value="Ensaio"/>	Horas Máquina	
Óleo	Ester ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Rolos (rodagem)	Horas Óleo	2	Data	09-03-2011
	Diluição	1,000	DL 96,7	DS	39,9	CPUC	1,4E+02
						ISUC	7,8E+03

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
25	1000	<input type="text" value="Núcleo"/>	<input type="text" value="Verde / Branca"/>	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	<input type="text" value="Fadiga"/>	

Observações

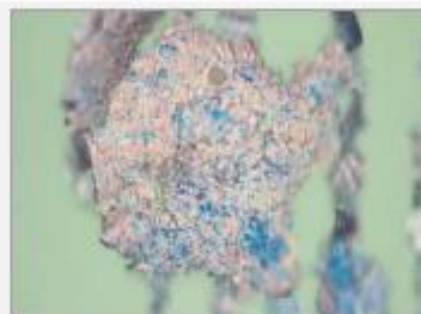
Ampliação da Fotografia ID_foto 21. Partícula ferrosa de grande dimensão e outras de menores dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
26	1000	<input type="text" value="Núcleo"/>	<input type="text" value="Verde / Branca"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	<input type="text" value="Fadiga"/>	

Observações

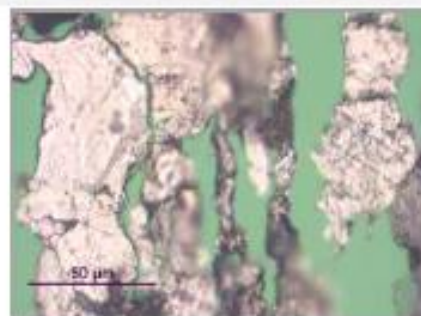
Aspecto da partícula da fotografia ID_25 após Tratamento Térmico. A alteração de tonalidade para azul, indica tratar-se de uma partícula de aço de baixa liga.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
27	1000	<input type="text" value="Núcleo"/>	<input type="text" value="Verde / Branca"/>	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	<input type="text" value="Outros"/>	

Observações

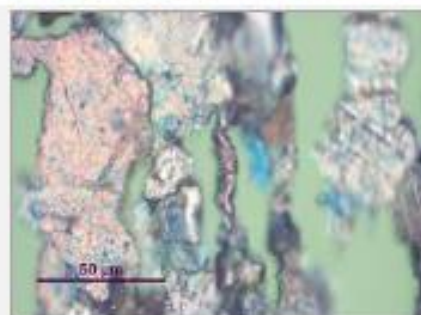
Ampliação da Fotografia ID_foto 21. Partículas ferrosas de desgaste de grandes e médias dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
28	1000	<input type="text" value="Núcleo"/>	<input type="text" value="Verde / Branca"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	<input type="text" value="Outros"/>	

Observações

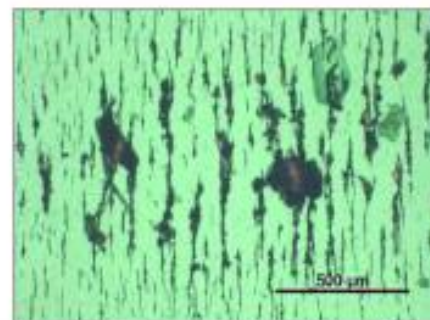
Aspecto das partículas da Fotografia anterior após Tratamento Térmico. A alteração de tonalidade para azul, indica tratar-se de uma partícula de aço de baixa liga.



ID 9 Máquina Equipamento Horas Máquina
 Óleo Ester ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Rolos Horas Óleo 48 Data 09-03-2011
 Diluição 1,000 DL 96,7 D5 39,9 CPUC 1,4E+02 ISUC 7,8E+03

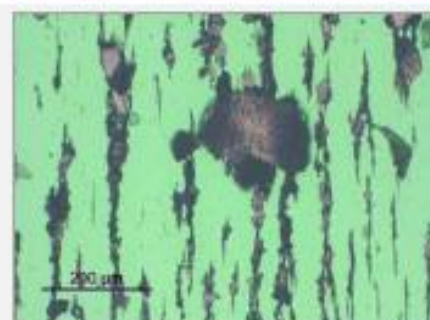
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 30 100
 Tipo de Desgaste

Observações
 Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 31 200
 Tipo de Desgaste

Observações
 Ampliação da Fotografia ID_foto 30. Presença de partículas de pequenas e grandes dimensões.



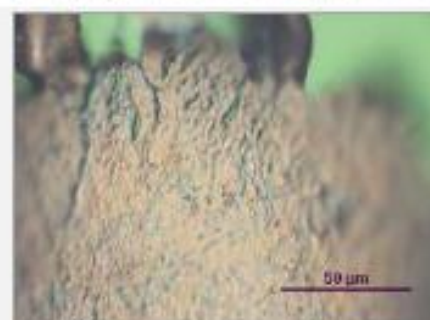
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 32 1000
 Tipo de Desgaste

Observações
 Ampliação da Fotografia ID_foto 31. Partede uma das partículas de grandes dimensões.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 33 200
 Tipo de Desgaste

Observações
 Aspecto da partícula anterior após Tratamento Térmico. A alteração de tonalidade para azul não foi muito pronunciada (?).



ID 10 Máquina Equipamento Horas Máquina

Óleo Ester ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Rolos (10R) 50H Horas Óleo 50 Data 09-03-2011

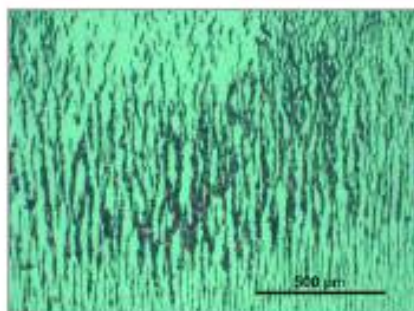
Diluição 0,100 DL 54,4 DS 10,6 CPUC 6,5E+02 ISUC 2,8E+05

ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

38 100

Tipo de Desgaste

Observações
 Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.

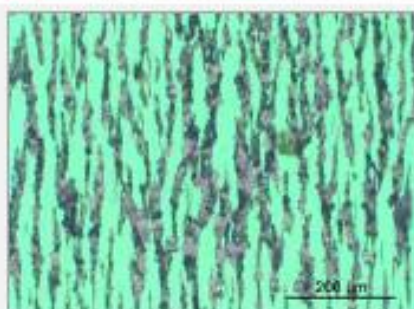


ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

39 200

Tipo de Desgaste

Observações
 Ampliação da Fotografia ID_foto 38. Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.

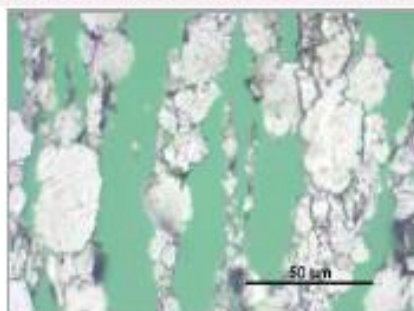


ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

40 1000

Tipo de Desgaste

Observações
 Ampliação da Fotografia ID_foto 38. Partículas ferrosas de grandes dimensões típicas de desgaste de fadiga.

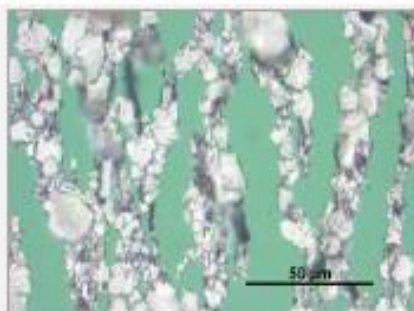


ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

41 1000

Tipo de Desgaste

Observações
 Ampliação da Fotografia ID_foto 39. Partículas ferrosas de médias dimensões típicas de desgaste de fadiga.

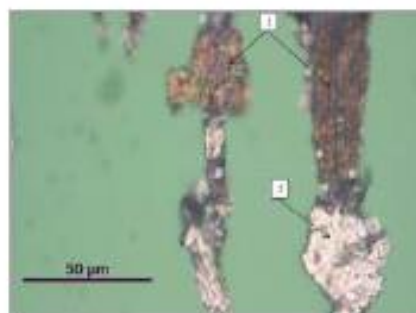


ID	9	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina				
Óleo	Ester ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Rolos	Horas Óleo	48	Data	09-03-2011			
	Diluição	1,000	DL	96,7	DS	39,9	CPUC	1,4E+02	ISUC	7,8E+03

ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

43 1000 Núcleo Verde / Branca

Tipo de Desgaste Fadiga



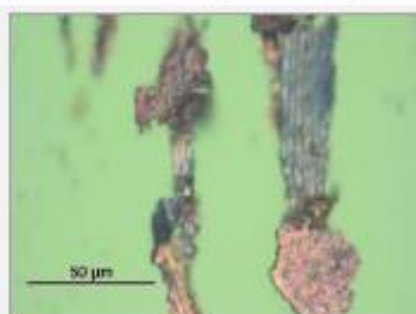
Observações

Partículas ferrosas de pequenas dimensões típicas de desgaste de fadiga (2). Presença polímeros de atrito (1).

ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

44 1000 Núcleo Verde / Branca

Tipo de Desgaste Fadiga



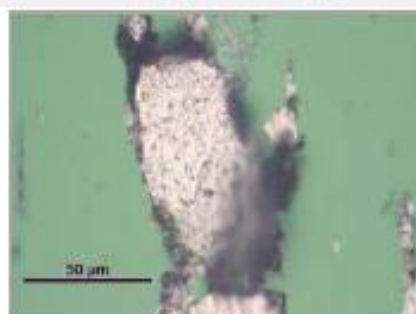
Observações

Aspecto das partículas da Fotografia ID_foto 43 Tratamento Térmico. A alteração de tonalidade para azul, indica tratar-se de partículas de aço de baixa liga.

ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

45 1000 Núcleo Verde / Branca

Tipo de Desgaste Gripagem



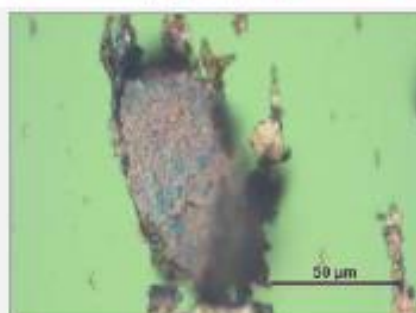
Observações

Partícula ferrosa de grande dimensão e de alguns óxidos.

ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

46 1000 Núcleo Verde / Branca

Tipo de Desgaste Gripagem



Observações

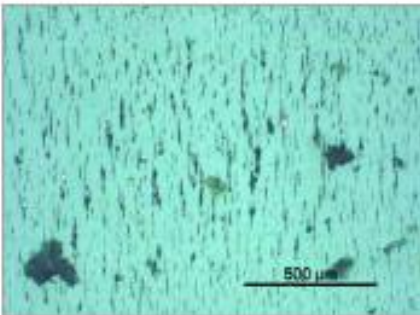
Aspecto da partícula da fotografia ID_45 após Tratamento Térmico. A alteração de tonalidade para azul, indica tratar-se de uma partícula de aço de baixa liga.

ID	11	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	Ester ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Rolos (10R)	Horas Óleo	50	Data	09-06-2011
	Diluição	0,100	DL	24,1	DS	5,2	CPUC 2,9E+02 ISUC 5,5E+04

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
47	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

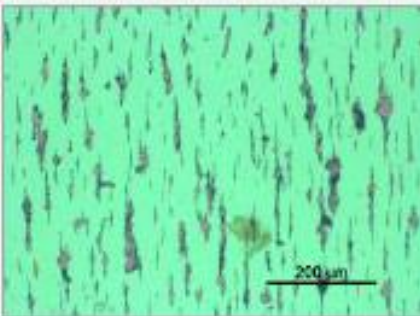
Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
48	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

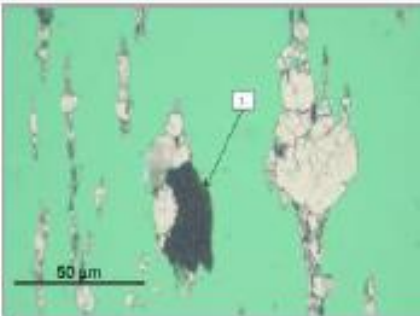
Ampliação da Fotografia ID_foto 47. Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
49	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	

Observações

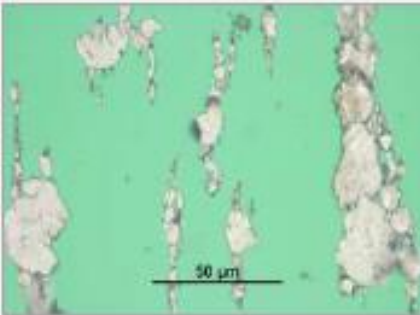
Ampliação da Fotografia ID_foto 47. Partículas ferrosas de grandes dimensões típicas de desgaste de fadiga. Presença de alguns óxidos térmicos (1).



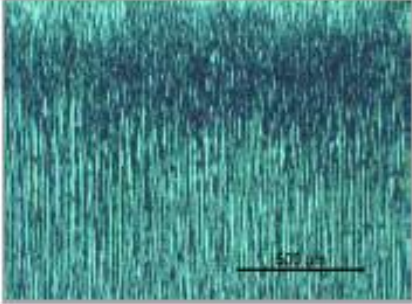
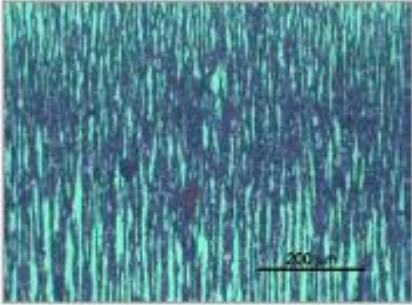
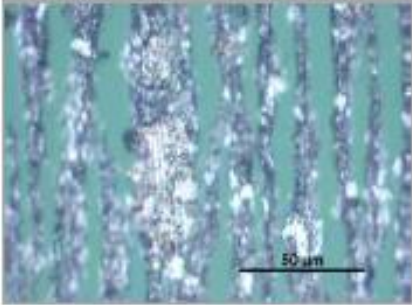
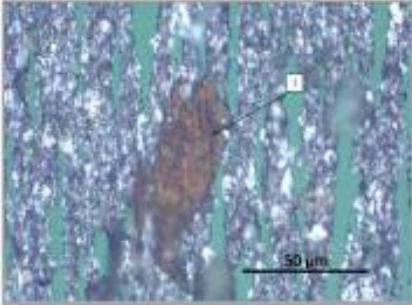
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
50	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	

Observações

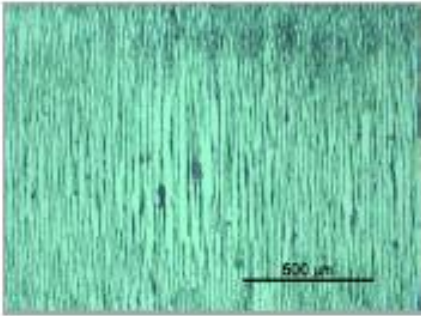
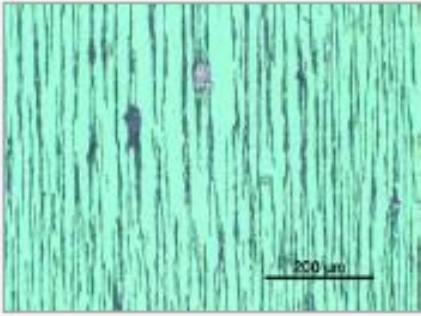
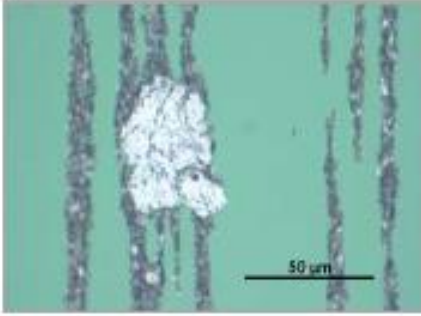
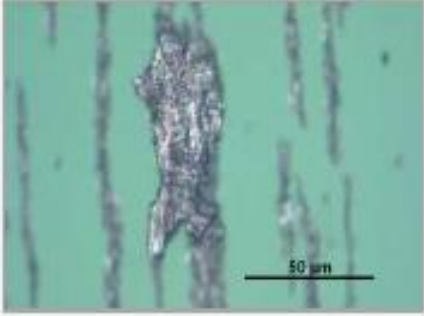
Ampliação da Fotografia ID_foto 48. Partículas ferrosas de grandes dimensões típicas de desgaste de fadiga.



ID	12	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	Ester ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas (7)	Horas Óleo	50	Data	09-06-2011
Diluição	0,010	DL	112,0	DS	23,8	CPUC	1,4E+04
						ISUC	1,2E+08

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	Tipo de Desgaste	Observações	Imagem
51	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	Outros	Presença abundante de partículas ferrosas de pequenas e algumas de grandes dimensões.	
52	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	Desgaste severo	Ampliação da Fotografia ID_ 51. Presença abundante de partículas ferrosas de pequenas e algumas de grandes dimensões.	
53	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	Desgaste severo	Ampliação da Fotografia ID_ 52. Presença de partículas ferrosas de pequenas e algumas de grandes dimensões.	
54	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	Desgaste severo	Ampliação da Fotografia ID_ 52. Partículas ferrosas de desgaste de pequenas dimensões. Presença de uma partícula não ferrosas de grandes dimensões com tonalidade castanha (1).	

ID	13	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	Ester ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas	Horas Óleo	100	Data	09-06-2011
Diluição	0,010	DL	71,9	DS	9,1	CPUC	8,1E+03
ISUC							5,1E+07

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
55	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
Tipo de Desgaste: Outros				
Observações: Presença abundante de partículas ferrosas de pequenas e algumas de grandes dimensões.				
				
56	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
Tipo de Desgaste: Outros				
Observações: Ampliação da Fotografia ID_foto 55. Presença abundante de partículas ferrosas de pequenas e algumas de grandes dimensões.				
				
57	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
Tipo de Desgaste: Fadiga				
Observações: Ampliação da Fotografia ID_foto 56. Partícula ferrosa de desgaste de fadiga de grandes dimensões.				
				
58	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
Tipo de Desgaste: Outros				
Observações: Ampliação da Fotografia ID_foto 56. Partícula ferrosa de desgaste de grandes dimensões e oxidada termicamente.				
				

ID 14 Máquina Equipamento Horas Máquina

Óleo Ester ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Esferas (21) Horas Óleo 2 Data 04-04-2011

Diluição 1,000 DL 165,4 DS 96,6 CPUC 2,6E+02 ISUC 1,8E+04

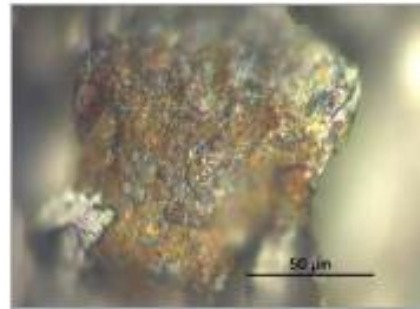
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

59 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Partícula ferrosa de grandes dimensões e ligeiramente revestida por óxidos alaranjados.



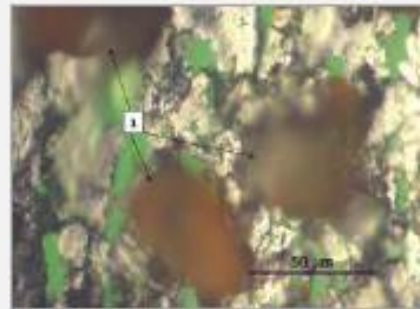
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

60 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Partículas ferrosas de desgaste de médias e grandes dimensões e de alguns óxidos de ferro laranja (1) (ferrugem).



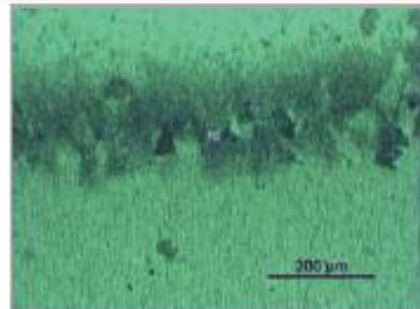
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

61 200

Tipo de Desgaste

Observações

Partículas ferrosas de pequenas dimensões típicas de desgaste de corrosão.



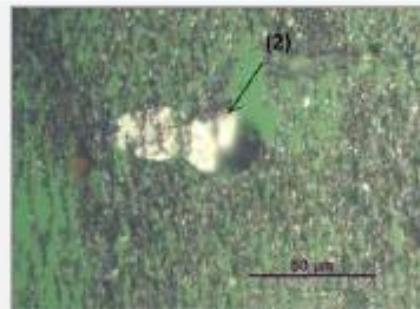
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

63 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_61. Partículas ferrosas de pequenas dimensões típicas de desgaste de corrosão. Presença de uma partícula não ferrosa de grandes dimensões (2).



ID 16 Máquina Equipamento Horas Máquina

Óleo Ester ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Esferas (21) Horas Óleo 48 Data 04-04-2011

Diluição 1,000 DL 97,2 D5 37,9 CPUC 1,4E+02 ISUC 8,0E+03

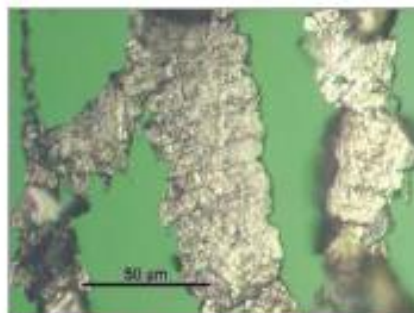
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

70 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Partículas de desgaste de grandes dimensões típicas de desgaste de fadiga.



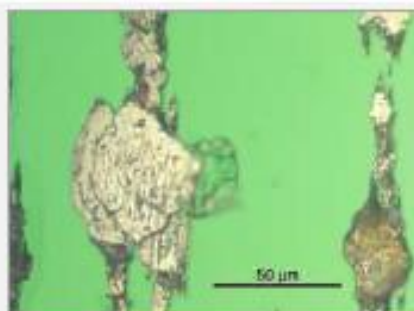
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

71 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Partículas de desgaste de grandes dimensões típicas de desgaste de fadiga.



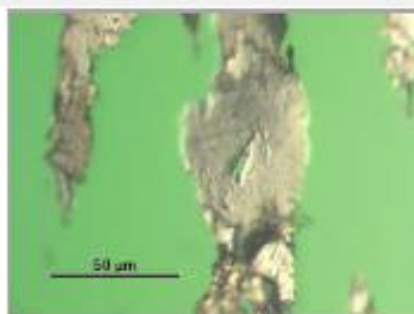
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

72 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Partículas de desgaste de grandes dimensões típicas de desgaste de fadiga.



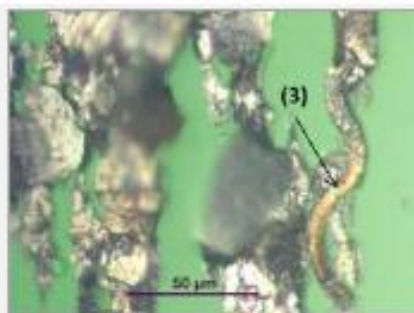
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

73 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Partículas de desgaste de grandes dimensões, algumas severamente oxidadas e outras de desgaste de corte (3).



ID	17	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	Mineral ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Rolos (Rodagem)	Horas Óleo	12	Data	28-02-2011
	Diluição	1,000	DL 45,8 DS 26,4	CPUC	7,2E+01	ISUC	1,4E+03

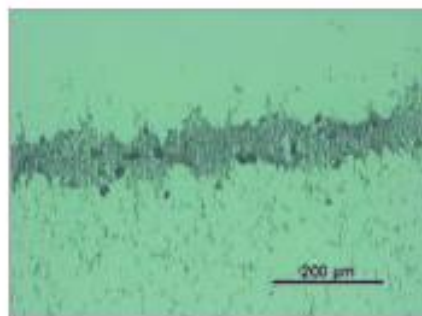
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

74 200 Saída Verde / Branca

Tipo de Desgaste Corrosão

Observações

Presença de algumas partículas ferrosas de muito pequenas dimensões (típicas de desgaste de corrosão).



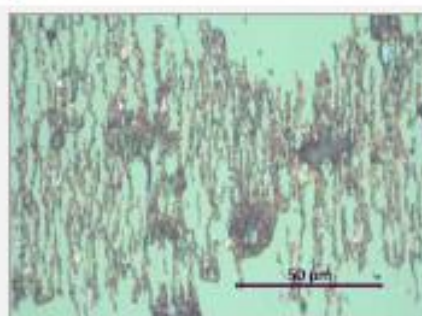
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

75 1000 Saída Verde / Branca

Tipo de Desgaste Corrosão

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 74. Aspecto das partículas ferrosas de pequenas dimensões. Algumas dessas partículas encontram-se aglomeradas.



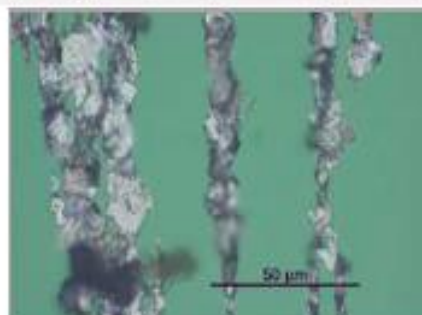
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

76 1000 Núcleo Verde / Branca

Tipo de Desgaste Outros

Observações

Partículas ferrosas de médias dimensões e alguns óxidos térmicos.



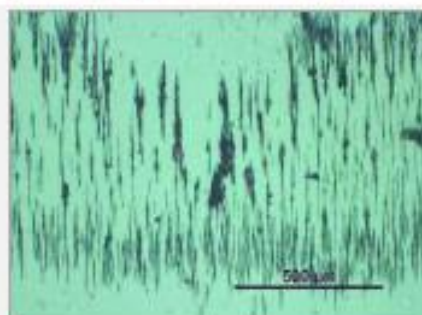
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

77 1000 Núcleo Verde / Branca

Tipo de Desgaste Outros

Observações

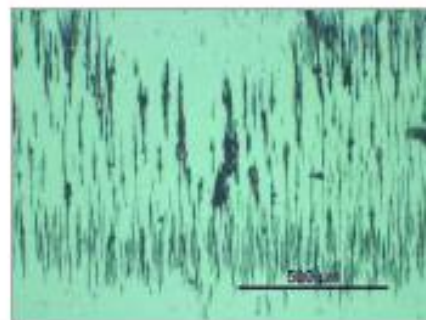
Aspecto de algumas partículas da Fotografia ID_foto 76, após Tratamento Térmico. Note-se que a tonalidade de algumas das partículas não alterou, significando que podem ser de aço de média ou alta liga



ID 18 Máquina Equipamento Horas Máquina
 Óleo Mineral ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Rolos Horas Óleo 48 Data 28-02-2011
 Diluição 1,000 DL 58,7 DS 31,1 CPUC 9,0E+01 ISUC 2,5E+03

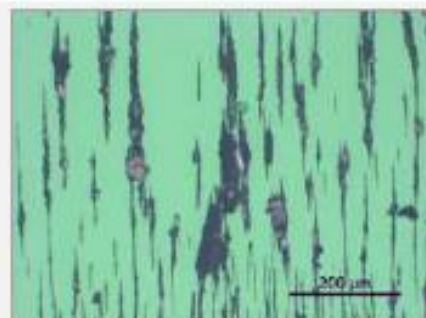
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 78 100
 Tipo de Desgaste

Observações
 Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



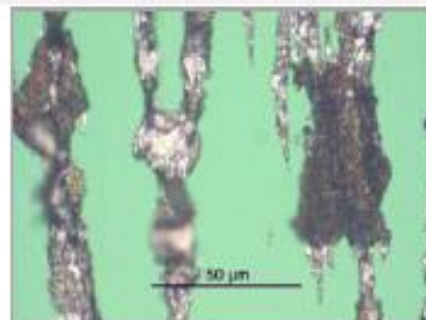
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 79 200
 Tipo de Desgaste

Observações
 Ampliação da Fotografia ID_foto 78. Presença significativa de partículas ferrosas de grandes dimensões, algumas severamente oxidadas.



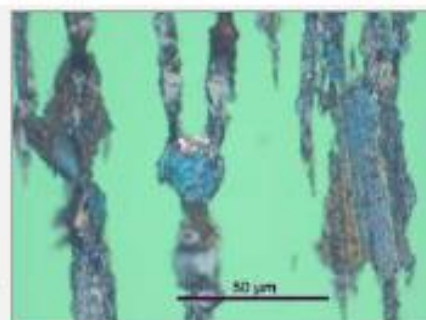
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 81 1000
 Tipo de Desgaste

Observações
 Ampliação da Fotografia ID_foto 78. Presença de partículas ferrosas de grandes dimensões, algumas oxidadas.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 82 1000
 Tipo de Desgaste

Observações
 Aspecto das partículas da fotografia ID_ 81 após Tratamento Térmico. A alteração de tonalidade para azul, indica tratarem-se de partículas de aço de baixa liga.

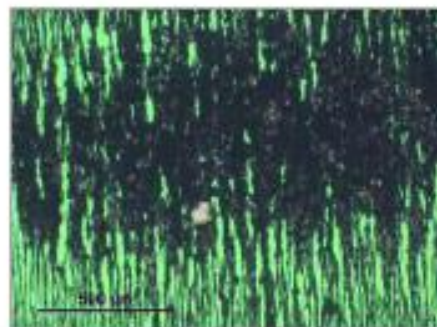


ID	19	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	Mineral ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas (21)	Horas Óleo	2	Data	28-03-2011
	Diluição	1,000	DL 146,7	DS	65,5	CPUC	2,1E+02
						ISUC	1,7E+04

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
83	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

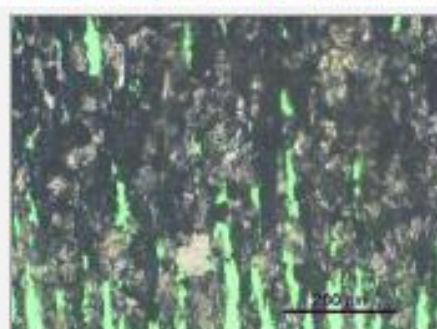
Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
84	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

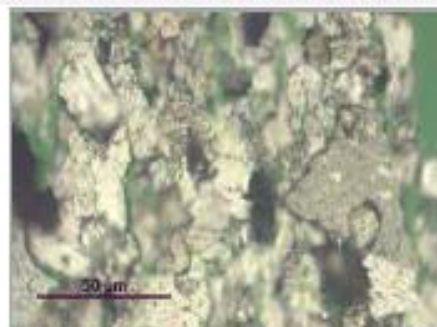
Ampliação da Fotografia ID_foto 83. Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
85	1000	Saída	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

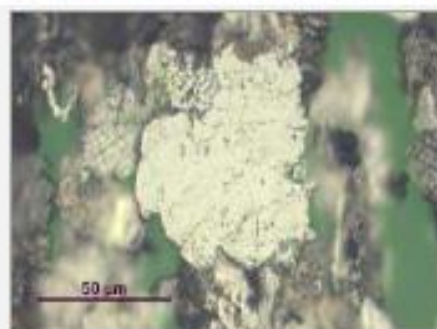
Ampliação da Fotografia ID_foto 84. Presença de muitas partículas ferrosas de grandes dimensões, algumas severamente oxidadas.



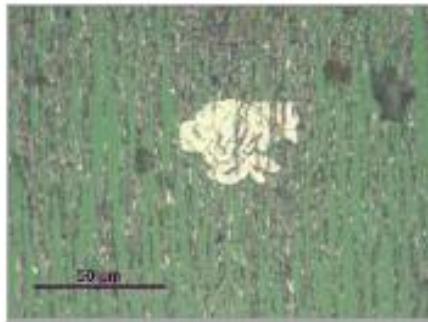
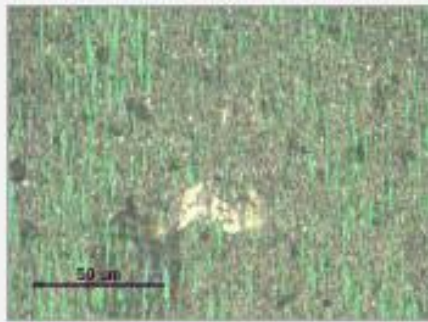
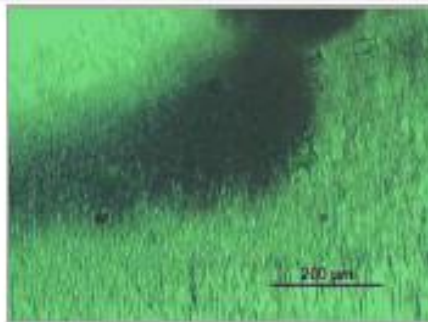
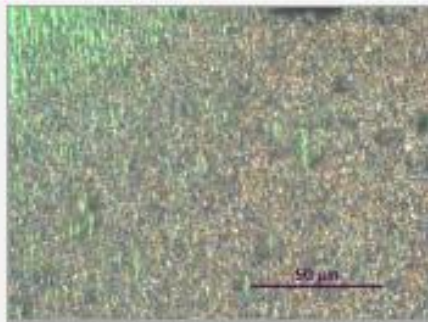
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
86	1000	Saída	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 84. Partícula ferrosa de grandes dimensões, típica de desgaste de fadiga e partículas ferrosas de menores dimensões, mas oxidadas.



ID	19	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	Mineral ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas (21)	Horas Óleo	2	Data	28-03-2011
	Diluição	1,000	DL	146,7	D5	65,5	CPUC 2,1E+02 ISUC 1,7E+04

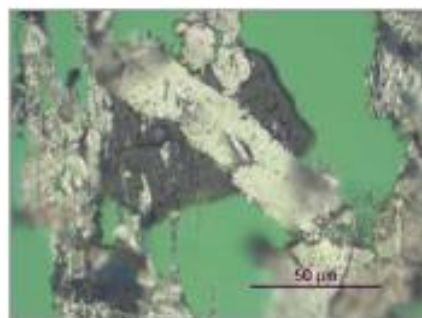
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	
87	1000	Meio	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	
					Tipo de Desgaste: <input type="text" value="Outros"/>
<p>Observações</p> <p>Presença de partículas ferrosas de pequenas dimensões e de uma partícula não ferrosa (metal branco) <input type="checkbox"/>.</p> <p>Presença de partículas ferrosas de pequenas dimensões e de uma</p>					
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	
88	1000	Meio	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	
					Tipo de Desgaste: <input type="text" value="Outros"/>
<p>Observações</p> <p>Presença de partículas ferrosas de pequenas dimensões e de uma partícula não ferrosa (metal branco).</p>					
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	
89	200	Saída	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	
					Tipo de Desgaste: <input type="text" value="Corrosão"/>
<p>Observações</p> <p>Partículas ferrosas de muito pequenas dimensões, típicas de desgaste de corrosão.</p>					
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	
90	1000	Saída	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	
					Tipo de Desgaste: <input type="text" value="Corrosão"/>
<p>Observações</p> <p>Ampliação da Fotografia ID_foto 89. Note-se a elevada concentração de partículas de muito pequenas dimensões, que são típicas de um desgaste de corrosão das superfícies ferrosas pelo lubrificante.</p>					

ID 20 Máquina Equipamento Horas Máquina
 Óleo Mineral ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Esferas (21) Horas Óleo 48 Data 28-03-2011
 Diluição 1,000 DL 65,9 DS 33,7 CPUC 1,0E+02 ISUC 3,2E+03

ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 91 1000
 Tipo de Desgaste

Observações

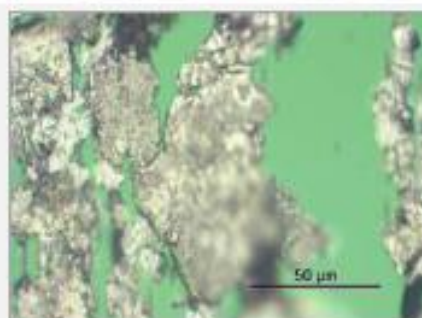
Presença de muitas partículas ferrosas de grandes dimensões, algumas severamente oxidadas.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 92 1000
 Tipo de Desgaste

Observações

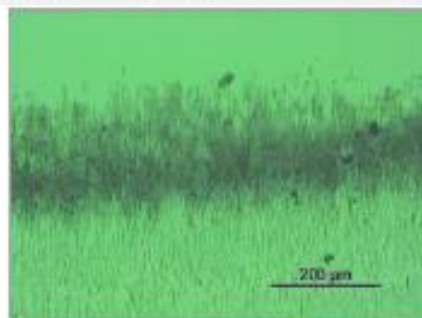
Presença de muitas partículas ferrosas de grandes dimensões, algumas oxidadas.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 93 200
 Tipo de Desgaste

Observações

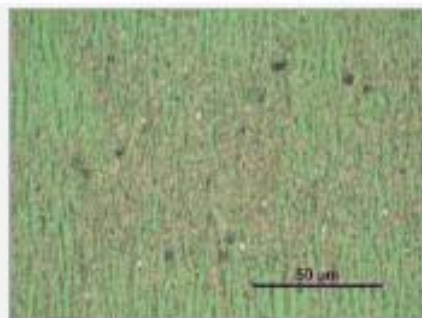
Partículas ferrosas de muito pequenas dimensões, típicas de desgaste de corrosão.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 94 1000
 Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 93. Elevada concentração de partículas de pequenas dimensões, típicas de desgaste de corrosão, mas em menor



ID 21 Máquina Equipamento Horas Máquina

Óleo Mineral ISO VB 320 Referência Rolamentos Axiais Horas Óleo 50 Data 10-06-2011
de Esferas (7)

Diluição 1,000 DL 70,8 D5 23,1 CPUC 9,4E+01 ISUC 4,5E+03

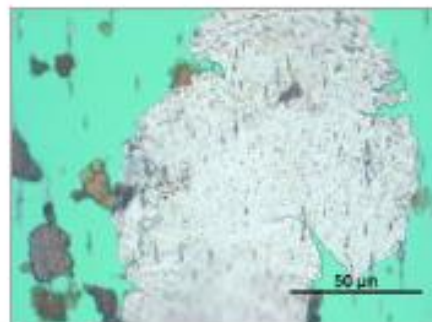
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

95 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Partícula ferrosa de grandes dimensões, típica de desgaste de fadiga..



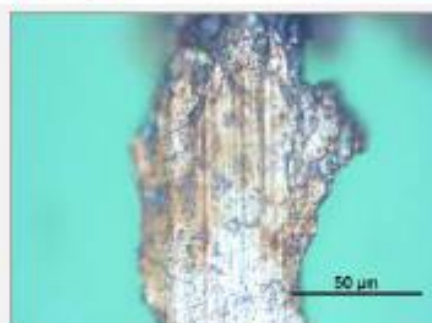
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

96 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_95. Partícula ferrosa de grandes dimensões, típica de desgaste de fadiga e ligeiramente oxidada.



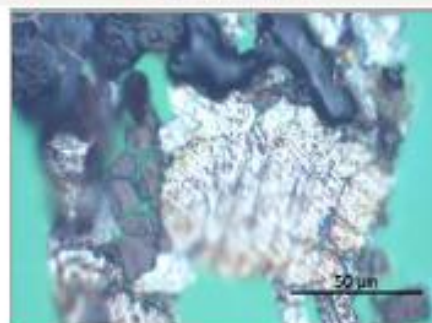
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

97 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Partícula ferrosa de desgaste de fadiga, de grandes dimensões e partículas de tonalidade negra.



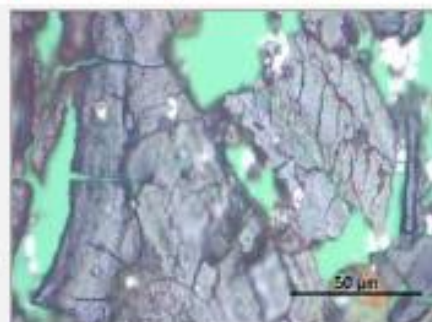
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

98 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 97. Aspecto das partículas de tonalidade escura. Note-se a fissuração das partículas evidenciando a sua fragilidade, possivelmente por se encontrarem totalmente carbonizadas.



ID 22 Máquina Equipamento Horas Máquina

Óleo Mineral ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Esferas (7) Horas Óleo 100 Data 09-06-2011

Diluição 0,010 DL 38,2 DS 16,8 CPUC 5,5E+03 ISUC 1,2E+07

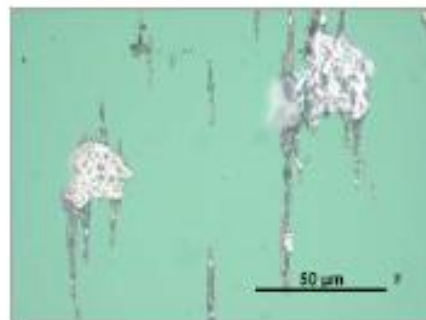
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

99 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Partículas ferrosas de grandes dimensões, típicas de desgaste de fadiga...



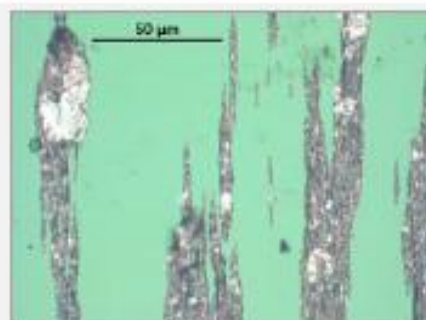
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

100 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Partículas ferrosas de pequenaas dimensões e algumas de grandes dimensões.



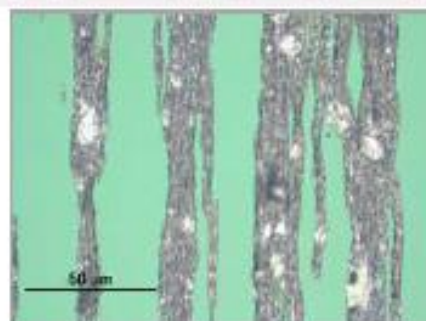
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

101 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Partículas ferrosas de pequenaas dimensões.



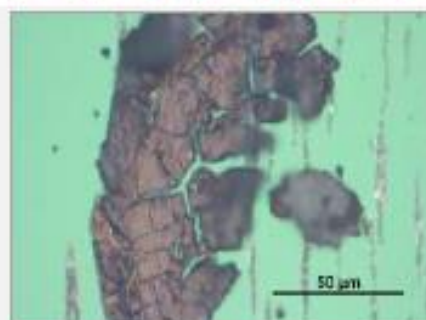
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

102 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Partícula de tonalidade escura, de grandes dimensões e totalmente fragmentada.

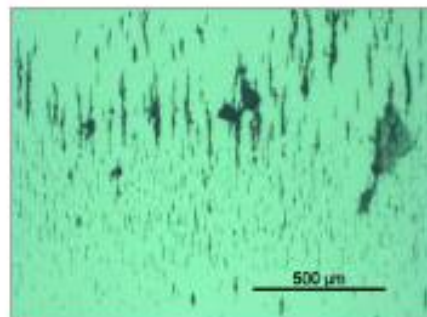


ID 23 Máquina **Ensaio Rolamentos** Equipamento **Ensaio** Horas Máquina
 Óleo Mineral ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Rolos (10R) 50H Horas Óleo 50 Data 09-03-2011
 Diluição 0,100 DL 24,9 DS 5,1 CPUC 3,0E+02 ISUC 5,9E+04

ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 103 100 **Núcleo** Verde / Branca
 Tipo de Desgaste **Outros**

Observações

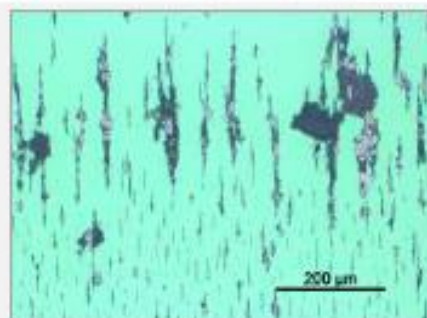
Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 104 200 **Núcleo** Verde / Branca
 Tipo de Desgaste **Outros**

Observações

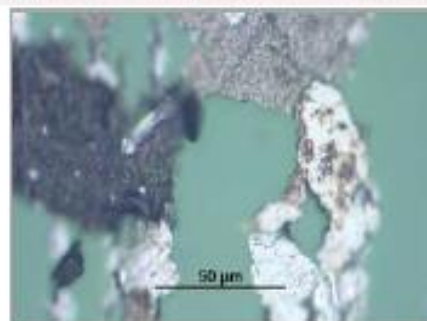
Ampliação da Fotografia ID_foto 103. Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 105 1000 **Núcleo** Verde / Branca
 Tipo de Desgaste **Fadiga**

Observações

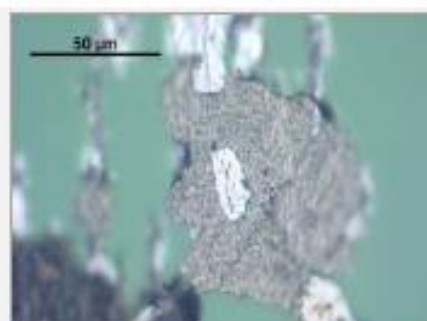
Ampliação da Fotografia ID_foto 103. Partículas ferrosas de grandes dimensões típicas de desgaste de fadiga, algumas muito oxidadas.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 106 1000 **Núcleo** Verde / Branca
 Tipo de Desgaste **Fadiga**

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 104. Partículas ferrosas de grandes dimensões típicas de desgaste de fadiga, algumas muito oxidadas.



ID 24 Máquina Equipamento Horas Máquina

Óleo Mineral ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Rolos (10R) Horas Óleo 100 Data 09-06-2011

Diluição 0,100 DL 12,8 DS 5,0 CPUC 1,8E+02 ISUC 1,4E+04

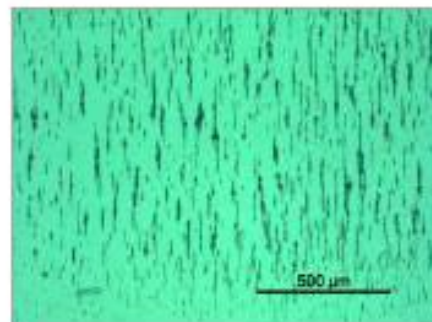
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

107 100

Tipo de Desgaste

Observações

Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



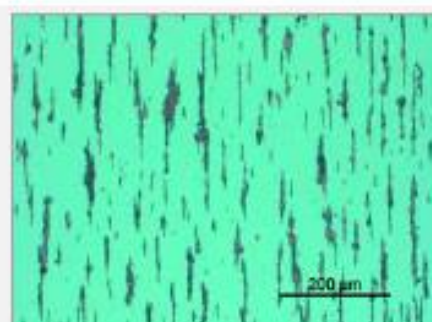
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

108 200

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 107. Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



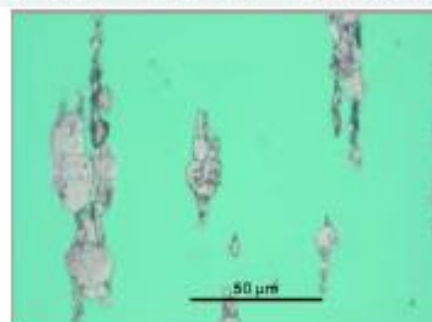
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

109 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 107. Presença de partículas ferrosas de médias dimensões típicas de desgaste de fadiga.



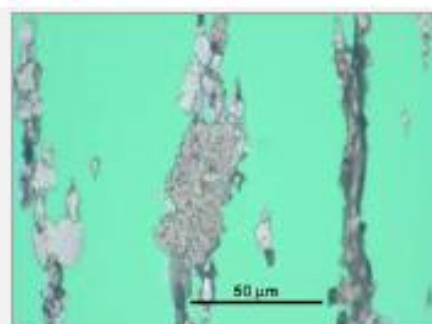
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

110 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 108. Presença de partículas ferrosas grandes dimensões típicas de desgaste de fadiga, algumas muito oxidadas.

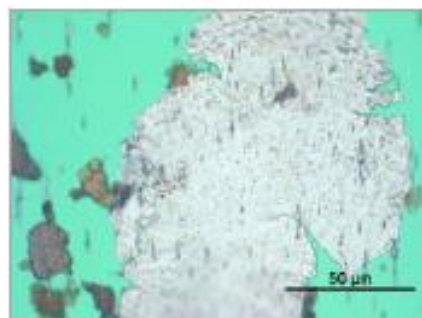


ID	25	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	Mineral ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas (7)	Horas Óleo	50	Data	10-06-2011
	Diluição	1,000	DL	70,8	DS	23,1	CPUC 9,4E+01 ISUC 4,5E+03

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
111	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	

Observações

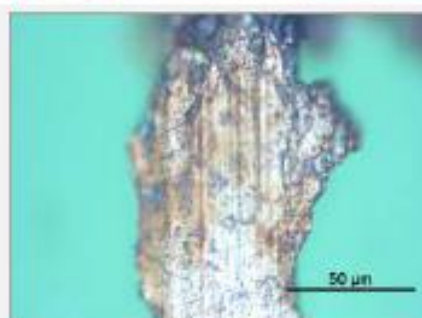
Partícula ferrosa de grandes dimensões, típica de desgaste de fadiga.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
112	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	

Observações

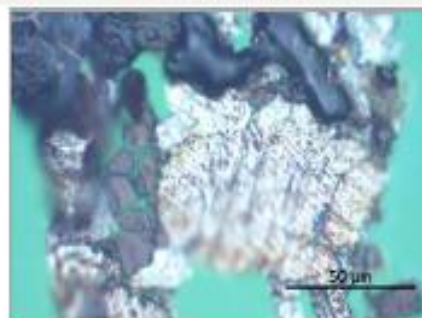
Partícula ferrosa de grandes dimensões, típica de desgaste de fadiga e ligeiramente oxidada.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
113	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	

Observações

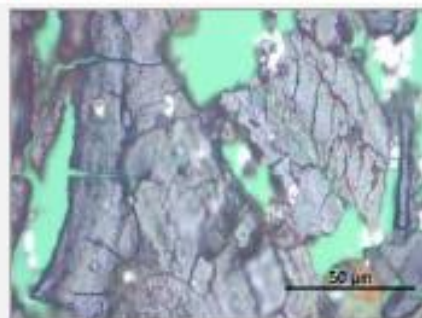
Partícula ferrosa de desgaste de fadiga, de grandes dimensões e partículas de tonalidade negra.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
114	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

Aspecto das partículas de tonalidade escura. Note-se a fissuração das partículas evidenciando a sua fragilidade.

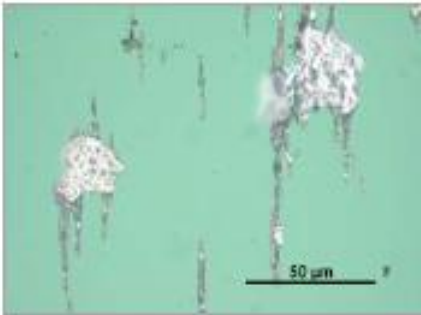


ID	26	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	Mineral ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas (7)	Horas Óleo	100	Data	09-06-2011
	Diluição	0,010	DL	38,2	DS	16,8	CPUC 5,5E+03 ISUC 1,2E+07

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	
117	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	
		Tipo de Desgaste	Fadiga		

Observações

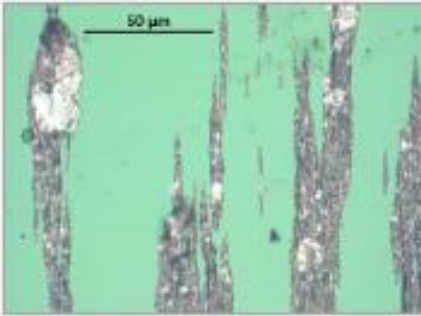
Ampliação da Fotografia . Partículas ferrosas de grandes dimensões, típicas de desgaste de fadiga.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	
118	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	
		Tipo de Desgaste	Outros		

Observações

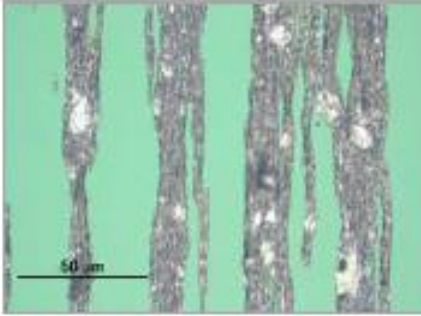
Ampliação da Fotografia. Partículas ferrosas de pequenas dimensões e algumas de grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	
119	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	
		Tipo de Desgaste	Outros		

Observações

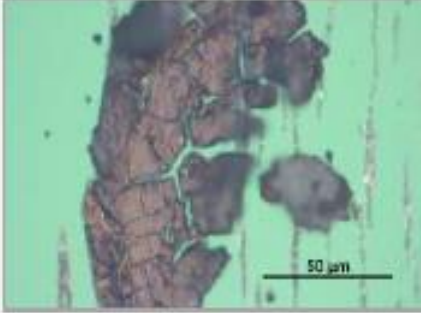
Ampliação da Fotografia. Partículas ferrosas de pequenas dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	
120	1000	Meio	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	
		Tipo de Desgaste	Outros		

Observações

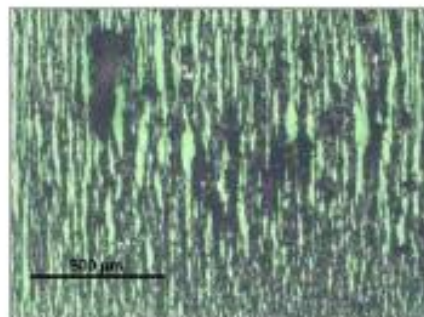
Ampliação da Fotografia. Partícula de tonalidade escura, de grandes dimensões e totalmente fragmentada.



ID	27	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina				
Óleo	MINR ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas Rodagem	Horas Óleo	16	Data	20-12-2011			
	Diluição	0,100	DL	99,8	DS	29,3	CPUC	1,3E+03	ISUC	9,1E+05

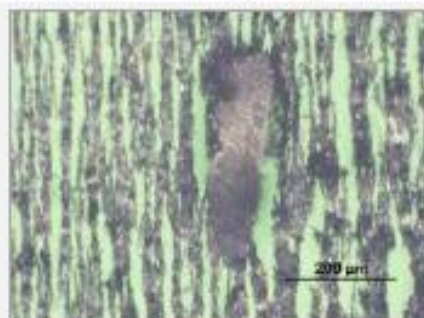
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
121	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações
 Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



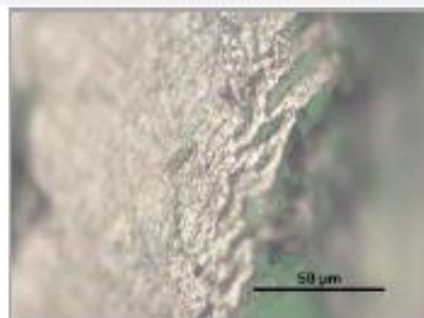
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
122	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações
 Ampliação da Fotografia ID_foto 121. Presença de partículas ferrosas de pequenas e algumas de muito grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
123	1000	Saída	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	

Observações
 Ampliação da Fotografia ID_foto 122. Partícula ferrosa de desgaste de fadiga com grandes dimensões e evidências de ruptura por uma forte deformação plástica.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
124	1000	Saída	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações
 Ampliação da Fotografia ID_foto 122. Partículas ferrosas de desgaste, algumas de grandes dimensões oxidadas e com deformação plástica.

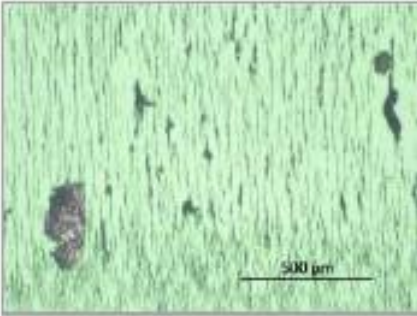


ID	28	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	MINR ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas (- 80°C)	Horas Óleo	5	Data	20-12-2011
	Diluição	0,100	DL	53,0	DS	18,6	CPUC 7,2E+02 ISUC 2,5E+05

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
125	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

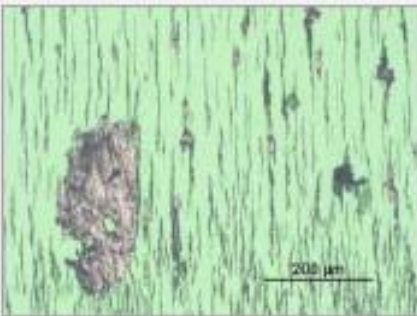
Presença de partículas ferrosas de pequenas dimensões e algumas de grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
126	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

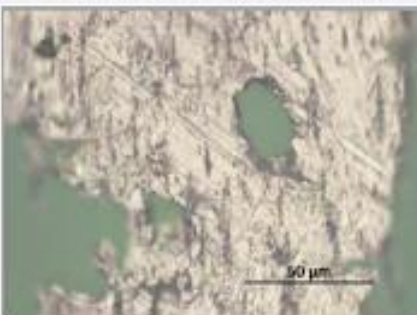
Ampliação da Fotografia ID_foto 125. Presença de partículas ferrosas de pequenas e algumas de grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
127	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

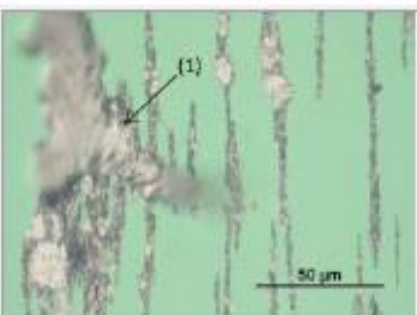
Ampliação da Fotografia ID_foto 126. Detalhe da partícula ferrosa de grandes dimensões. Note-se os orifícios circulares existentes na superfície, que



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
128	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Deformação Plás	

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 126. Partículas ferrosas de pequenas dimensões, algumas de grandes dimensões e com deformação plástica (1).

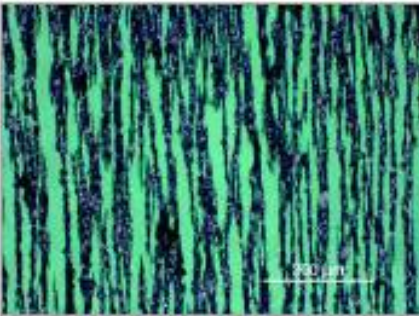


ID	29	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	PAO ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Rolos Rodagem	Horas Óleo	12	Data	28-02-2011
Diluição	1,000	DL	98,3	DS	39,7	CPUC	1,4E+02
		ISUC					8,1E+03

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
130	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

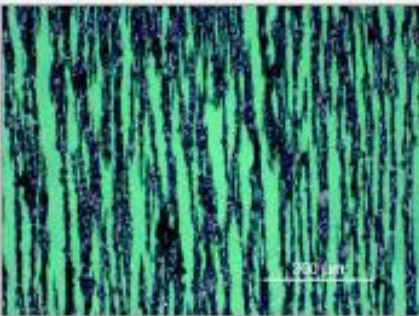
Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
131	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

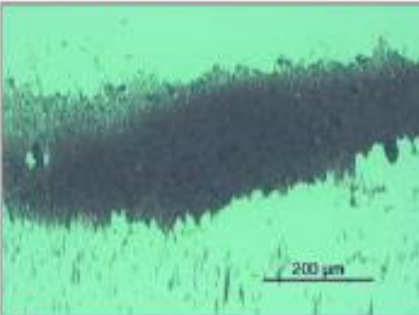
Ampliação da Fotografia ID_foto 130. Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
132	200	Saída	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Corrosão	

Observações


Presença significativa de partículas ferrosas de muito pequenas dimensões (típicas de desgaste de corrosão).



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
133	1000	Saída	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Corrosão	

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 132. Concentração excessiva de partículas ferrosas típicas de desgaste corrosivo.



ID	29	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	PAO ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Rolos Rodagem	Horas Óleo	12	Data	28-02-2011
	Diluição	1,000	DL 98,3 DS	39,7	CPUC	1,4E+02	ISUC 8,1E+03

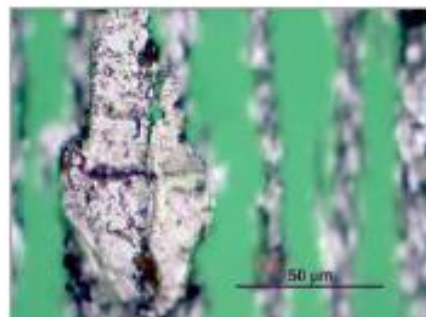
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

134 1000 Núcleo Verde / Branca

Tipo de Desgaste Gripagem

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 131. Partícula ferrosa de grande dimensão e outras de menores dimensões.



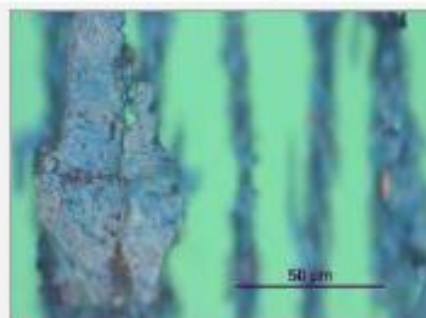
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

135 1000 Núcleo Verde / Branca

Tipo de Desgaste Gripagem

Observações

Aspecto da partícula ID_foto 134 após Tratamento Térmico. A alteração de tonalidade para azul, indica tratar-se de uma partícula de aço de baixa liga.



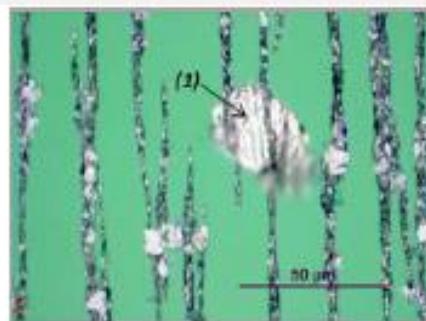
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

136 1000 Núcleo Verde / Branca

Tipo de Desgaste Outros

Observações

Partículas ferrosas de desgaste de pequenas e médias dimensões. (1) - Partícula de desgaste, de grande dimensão, mas que se encontra não alinhada



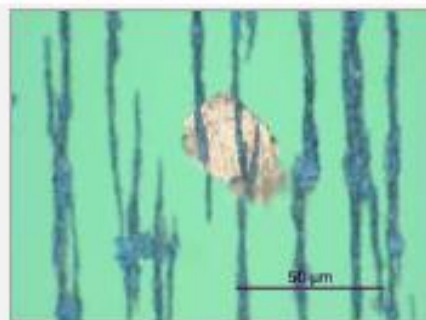
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

137 1000 Núcleo Verde / Branca

Tipo de Desgaste Outros

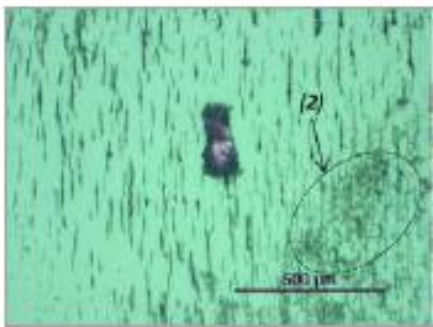
Observações

Aspecto das partículas da Fotografia ID_foto 136, após Tratamento Térmico. Note-se que a tonalidade da partícula não magnética não alterou, confirmando a sua natureza não ferrosa (metal branco).

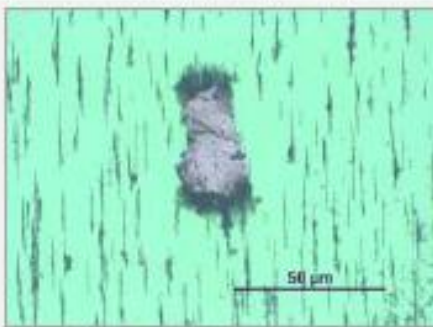


ID	30	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	PAO ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Rolos 48H	Horas Óleo	48	Data	28-02-2011
	Diluição	0,100	DL	40,3	DS	18,5	CPUC 5,9E+02 ISUC 1,3E+05

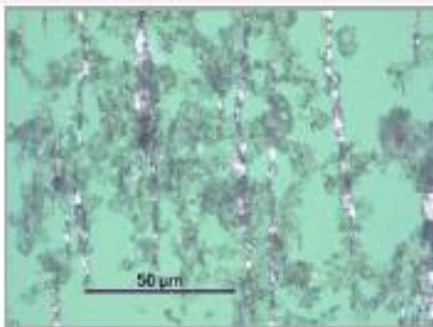
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	
138	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	
Tipo de Desgaste					Polímeros de Atr
Observações					
Presença de uma partícula ferrosa de desgaste de grandes dimensões e poucas de média e pequena dimensão. (2) - Presença significativa de polímeros de					



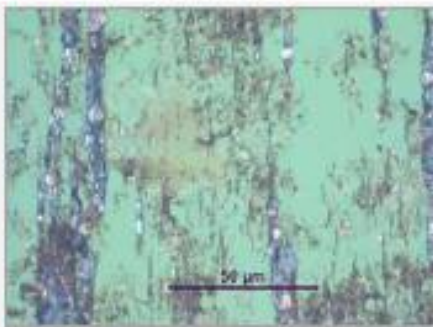
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	
139	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	
Tipo de Desgaste					Polímeros de Atr
Observações					
Ampliação da Fotografia ID_foto 138. Note-se a presença de poucas partículas de pequenas e médias dimensões.					



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	
140	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>	
Tipo de Desgaste					Polímeros de Atr
Observações					
Presença de partículas ferrosas de pequenas dimensões no seio de matrizes polimericas (polímeros de atrito).					



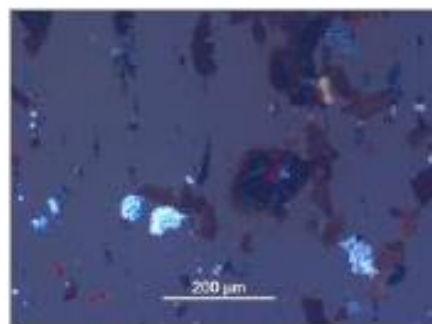
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico	
141	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input checked="" type="checkbox"/>	
Tipo de Desgaste					Polímeros de Atr
Observações					
Aspecto das partículas e dos polímeros de atrito após Tratamento Térmico.					



ID	31	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	PAO ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas (7 Esf.)	Horas Óleo	50	Data	09-06-2011
	Diluição	1,000	DL	63,7	DS	18,5	CPUC 8,2E+01 ISUC 3,7E+03

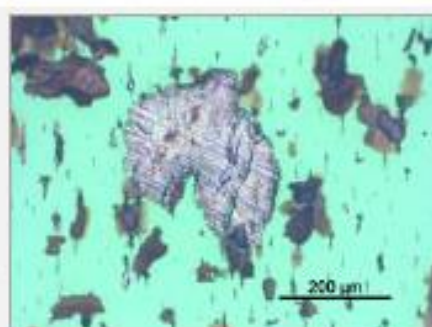
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
142	200	Núcleo	Polarizada	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Contaminação E	

Observações
 Presença de contaminantes externos (areia).



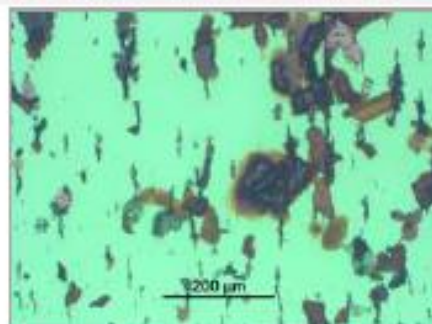
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
143	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Escorregamento	

Observações
 Partícula ferrosa de grandes dimensões, com marcas de escorregamento.



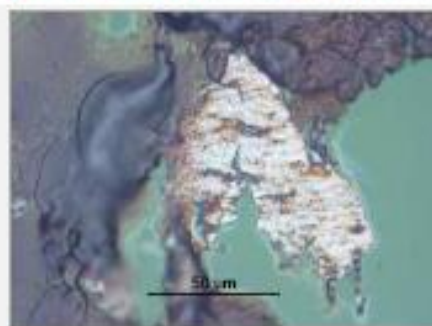
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
144	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações
 Ampliação da Fotografia ID_foto 143. Partículas de grandes dimensões não metálicas de tonalidade castanha.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
145	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	

Observações
 Ampliação da Fotografia ID_foto 143. Partícula ferrosa de grandes dimensões, típica de desgaste de fadiga envolvida nas partículas não metálicas que sugerem ser um tipo de resina.

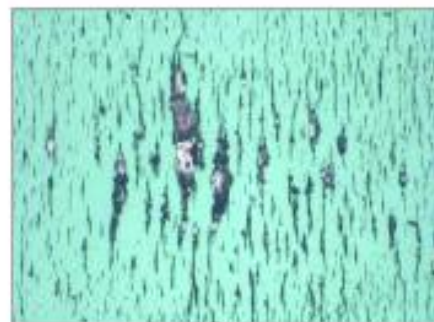


ID	32	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	PAO ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas (7 Esf.)	Horas Óleo	100	Data	09-06-2011
	Diluição	0,100	DL	29,7	D5	7,2	CPUC 3,7E+02 ISUC 8,3E+04

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
146	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

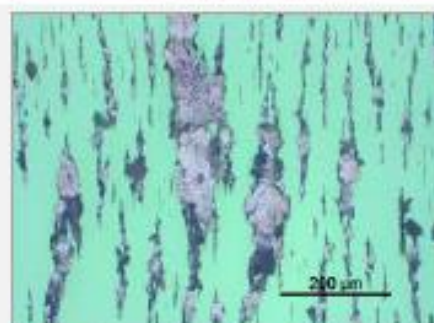
Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
147	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

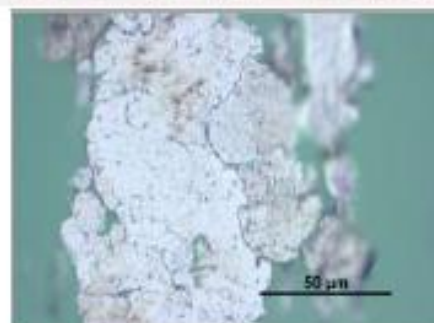
Ampliação da fotografia ID_foto 146. Partículas ferrosas de grandes dimensões, algumas oxidadas termicamente.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
148	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	

Observações

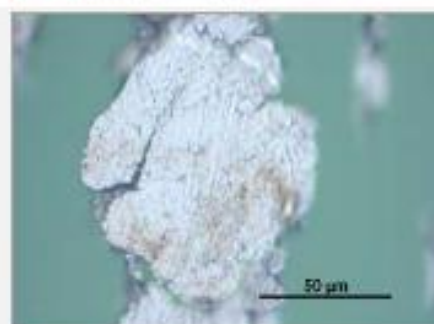
Ampliação da fotografia ID_foto 147. Partículas ferrosas de desgaste de fadiga de grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
149	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	

Observações

Ampliação da fotografia ID_foto 147. Partículas ferrosas de desgaste de fadiga de grandes dimensões.

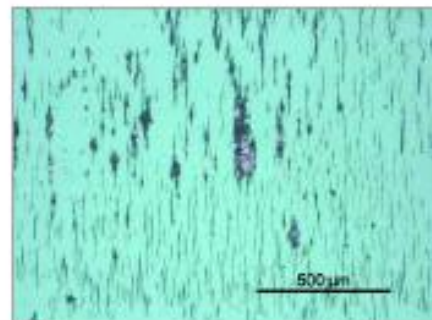


ID	33	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	PAO ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Rolos (10R) 50H	Horas Óleo	50	Data	09-06-2011
	Diluição	0,100	DL	26,9	DS	7,9	CPUC 3,5E+02 ISUC 6,6E+04

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
150	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

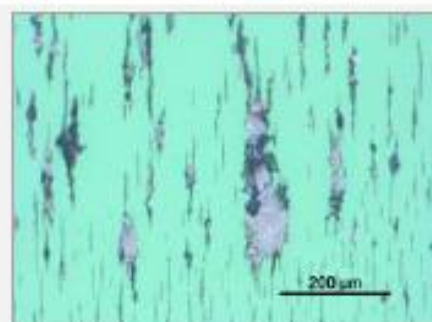
Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
151	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

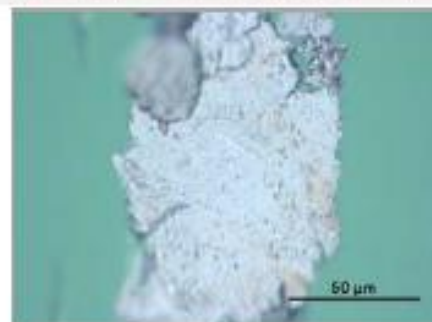
Ampliação da Fotografia ID_foto 150. Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
152	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	

Observações

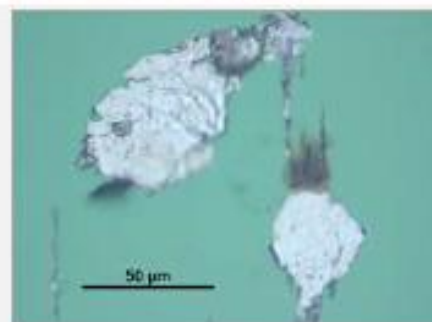
Ampliação da Fotografia ID_foto 150. Partícula ferrosa de grandes dimensões típica de desgaste de fadiga.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
153	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	

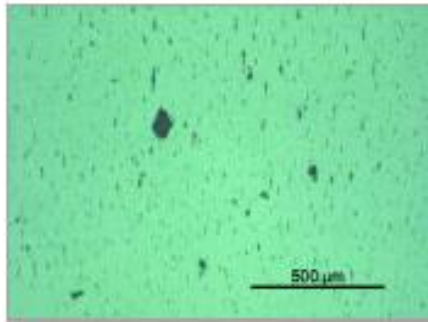
Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 151. Partículas ferrosas de grandes dimensões típicas de desgaste de fadiga.

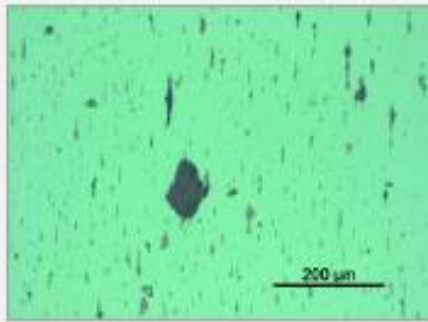


ID	34	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	PAO 320	Referência	Rolamentos Axiais de Rolos (10R)	Horas Óleo	100	Data	09-06-2011
Diluição	0,100	DL	12,5	D5	3,6	CPUC	1,6E+02
		ISUC					1,4E+04

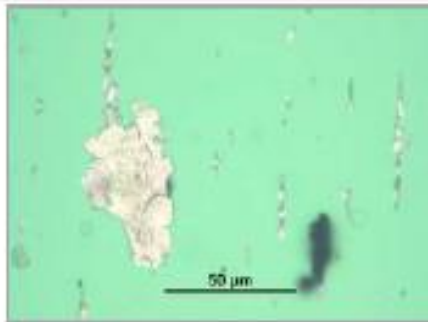
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
154	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	
Observações Presença de Particula ferrosas de pequenas e poucas de grandes dimensões.				



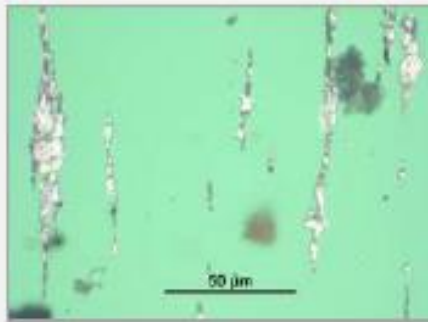
ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
155	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	
Observações Ampliação da Fotografia ID_foto 154. Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes.				



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
156	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Fadiga	
Observações Ampliação da Fotografia ID_foto 154. Presença de partículas ferrosas de grandes dimensões típica de desgaste de fadiga.				



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
157	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	
Observações Ampliação da Fotografia ID_foto 155. Presença de partículas ferrosas de pequenas dimensões.				

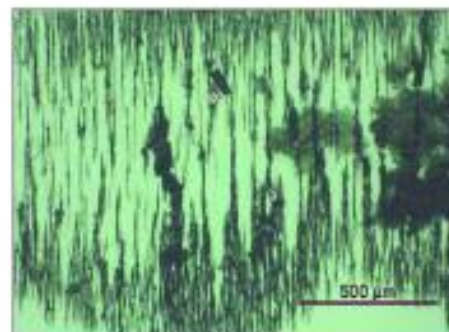


ID	35	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	PAO ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas (21)	Horas Óleo	2	Data	28-03-2011
	Diluição	1,000	DL	130,1	DS	55,8	CPUC 1,9E+02 ISUC 1,4E+04

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
158	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

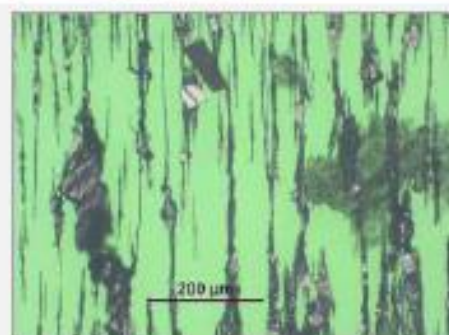
Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
159	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

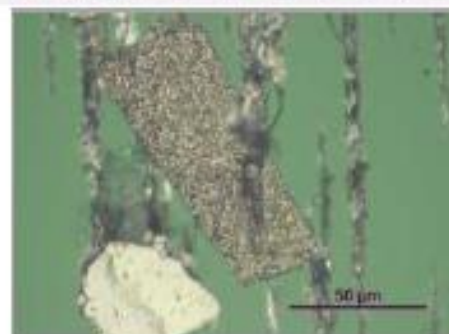
Ampliação da Fotografia ID_foto 158. Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões. Presença de alguns contaminantes externos.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
160	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

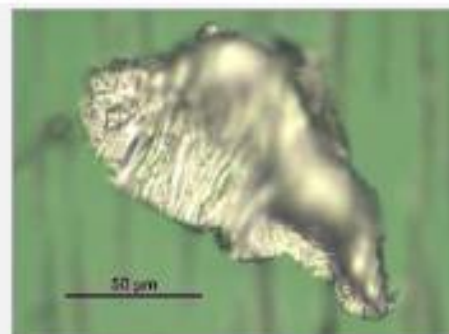
Ampliação da Fotografia ID_foto 159. Presença de algumas partículas de grandes dimensões e outras bastante oxidadas.



ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
161	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 159. Partícula não ferrosa (metal branco) de grandes dimensões.



ID	35	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	PAO ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas (21)	Horas Óleo	2	Data	28-03-2011
	Diluição	1,000	DL	130,1	DS	55,8	CPUC 1,9E+02 ISUC 1,4E+04

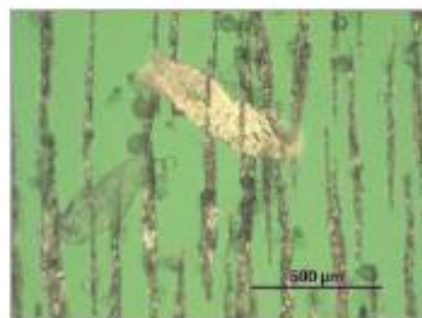
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

162 1000 Meio Verde / Branca

Tipo de Desgaste Outros

Observações

Presença de partículas ferrosas de pequenas dimensões e de uma partícula não ferrosa (metal branco).



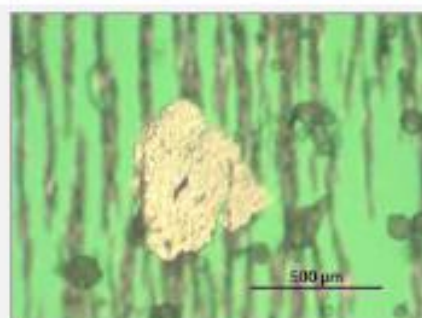
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

163 1000 Meio Verde / Branca

Tipo de Desgaste Outros

Observações

Presença de partículas ferrosas de pequenas dimensões e de uma partícula não ferrosa (metal branco). Presença de alguns contaminantes de forma esférica.



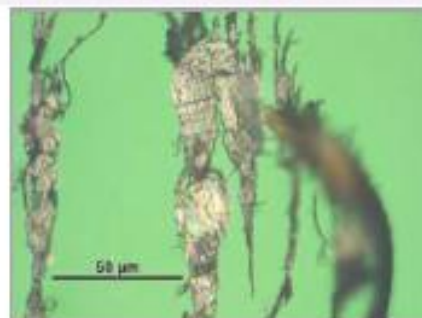
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

164 1000 Meio Verde / Branca

Tipo de Desgaste Corte

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 159. Partículas ferrosas de desgaste de pequenas e médias dimensões. Note-se a presença significativa de partículas muito finas e compridas, resultantes de desgaste de corte.



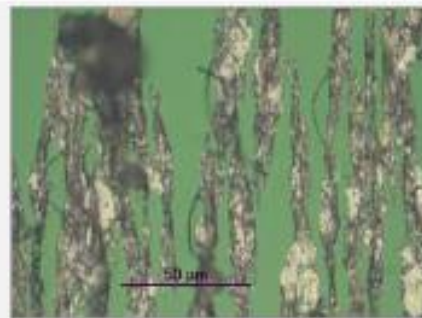
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

165 1000 Meio Verde / Branca

Tipo de Desgaste Corte

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 159. Partículas ferrosas de desgaste de pequenas e médias dimensões. Note-se a presença significativa de partículas muito finas e compridas, resultantes de desgaste de corte.



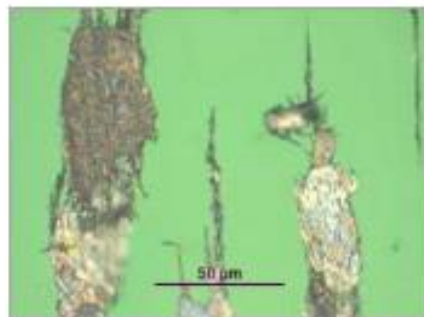
ID	36	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	PAO ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas (21) 48H	Horas Óleo	48	Data	28-03-2011
Diluição	1,000	DL	36,1	DS	14,8	CPUC	5,1E+01
		ISUC					1,1E+03

ID_foto: 166 Ampliação: 1000 Localização: Núcleo Luz: Verde / Branca Tratamento Térmico:

Tipo de Desgaste: Outros

Observações

Partículas ferrosas de grandes dimensões, algumas severamente oxidadas.

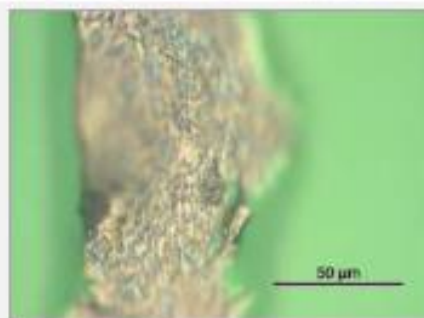


ID_foto: 167 Ampliação: 1000 Localização: Núcleo Luz: Verde / Branca Tratamento Térmico:

Tipo de Desgaste: Corte

Observações

Partícula ferrosa de grandes dimensões e oxidada.

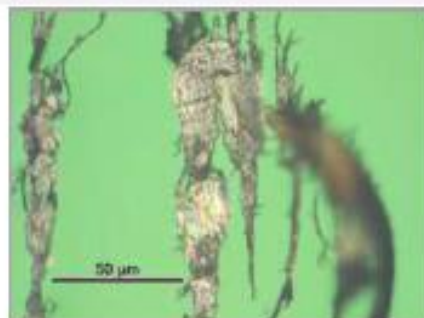


ID_foto: 168 Ampliação: 1000 Localização: Meio Luz: Verde / Branca Tratamento Térmico:

Tipo de Desgaste: Corte

Observações

Partículas ferrosas de desgaste de pequenas e médias dimensões. Note-se a presença significativa de partículas muito finas e compridas, resultantes de desgaste de corte.

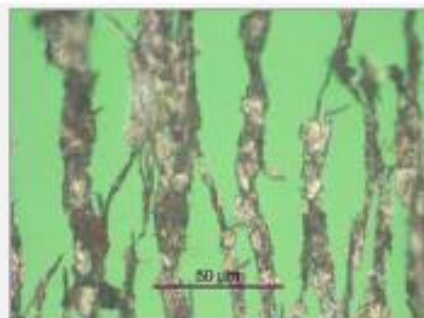


ID_foto: 169 Ampliação: 1000 Localização: Meio Luz: Verde / Branca Tratamento Térmico:

Tipo de Desgaste: Corte

Observações

Partículas ferrosas de desgaste de pequenas e médias dimensões. Note-se a presença significativa de partículas muito finas e compridas, resultantes de desgaste de corte.



ID 37 Máquina **Ensaio Rolamentos** Equipamento **Ensaio** Horas Máquina

Óleo **PAGR ISO VG 320** Referência **Rolamentos Axiais de Esferas Rodagem** Horas Óleo **16** Data **20-12-2011**

Diluição **1,000** DL **78,1** DS **8,5** CPUC **8,7E+01** ISUC **6,0E+03**

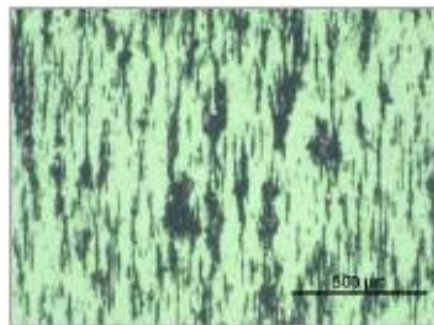
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

170 100 **Núcleo** **Verde / Branca**

Tipo de Desgaste **Outros**

Observações

Presença significativa de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



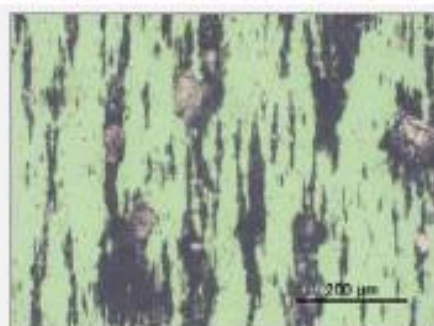
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

171 200 **Núcleo** **Verde / Branca**

Tipo de Desgaste **Outros**

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 170. Presença de partículas ferrosas de pequenas e algumas de muito grandes dimensões.



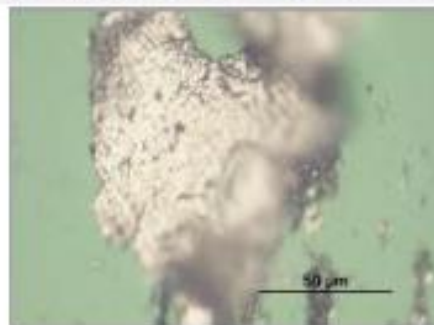
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

172 1000 **Núcleo** **Verde / Branca**

Tipo de Desgaste **Fadiga**

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 171. Partícula ferrosa de grandes dimensões, típica de desgaste de fadiga.



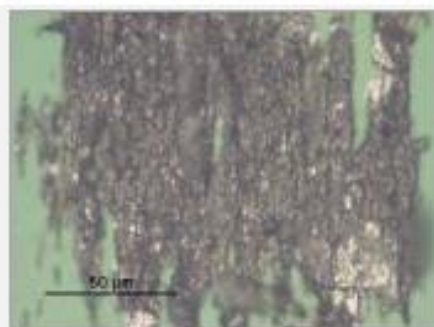
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

173 1000 **Núcleo** **Verde / Branca**

Tipo de Desgaste **Óxidos de Ferro**

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 171. Partículas ferrosas de pequenas dimensões (óxidos de ferro) aglomeradas em polímeros de atrito de grandes dimensões.



ID 38 Máquina Equipamento Horas Máquina

Óleo PAGR ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Esferas (- 80°C) Horas Óleo 5 Data 20-12-2011

Diluição 1,000 DL 100,2 DS 19,8 CPUC 1,2E+02 ISUC 9,6E+03

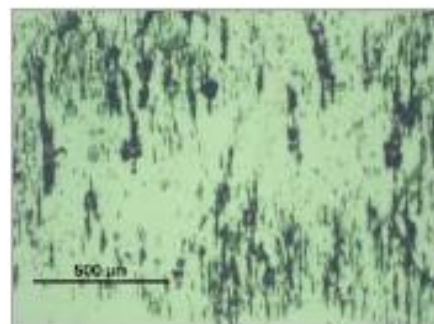
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

174 100

Tipo de Desgaste

Observações

Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



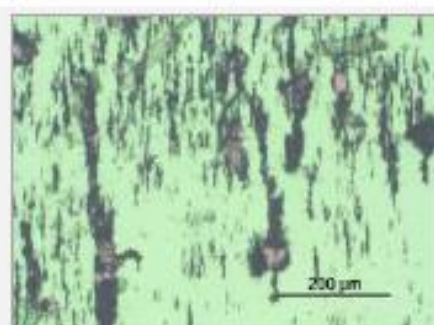
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

175 200

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 174. Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



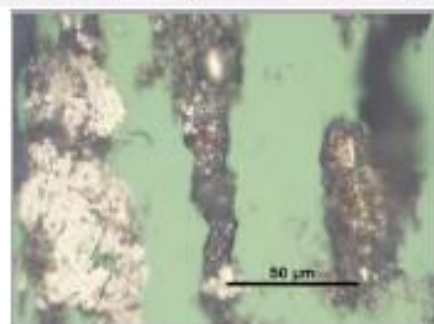
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

176 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 175. Partículas ferrosas de grandes dimensões, algumas severamente oxidadas.



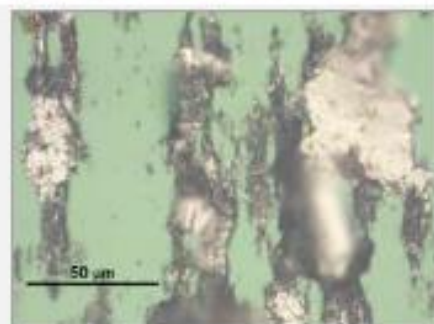
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

177 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 175. Partículas ferrosas de grandes dimensões, algumas severamente oxidadas.



ID	39	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina				
Óleo	MINR ISO VG 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas Rodagem	Horas Óleo	16	Data	20-12-2011			
	Diluição	1,000	DL	99,8	DS	29,3	CPUC	1,3E+02	ISUC	9,1E+03

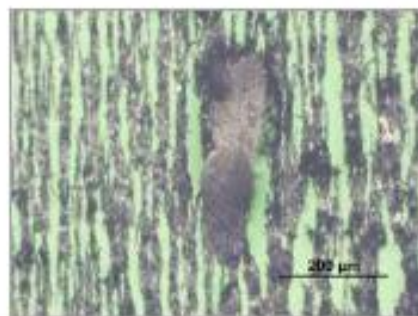
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

178 100 Núcleo Verde / Branca

Tipo de Desgaste Outros

Observações

Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



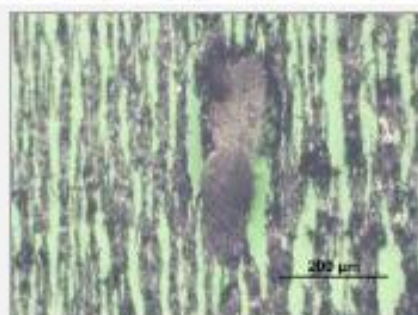
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

179 200 Núcleo Verde / Branca

Tipo de Desgaste Outros

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 178. Presença de partículas ferrosas de pequenas e algumas de muito grandes dimensões.



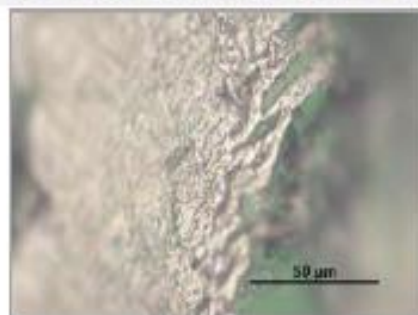
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

180 1000 Saída Verde / Branca

Tipo de Desgaste Deformação Plás

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 179. Partícula ferrosa de desgaste de fadiga com grandes dimensões e evidências de ruptura por uma forte deformação plástica.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

181 1000 Saída Verde / Branca

Tipo de Desgaste Deformação Plás

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 179. Partículas ferrosas de desgaste, algumas de grandes dimensões oxidadas e com deformação plástica.

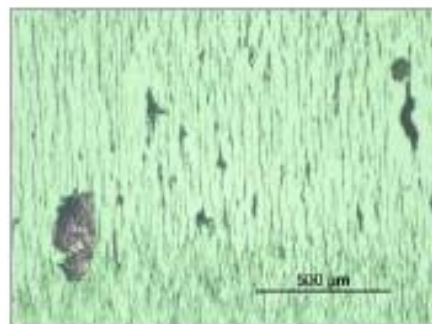


ID 40 Máquina Equipamento Horas Máquina
 Óleo MINR ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Esferas (- 80°C) Horas Óleo 5 Data 20-12-2011
 Diluição 0,100 DL 53,0 DS 18,6 CPUC 7,2E+02 ISUC 2,5E+05

ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 182 100
 Tipo de Desgaste

Observações

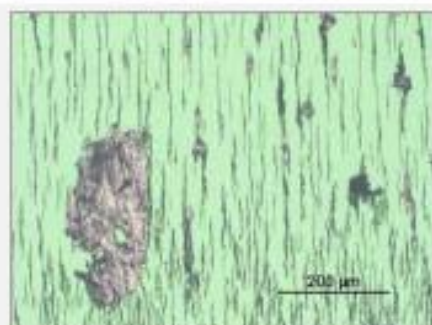
Presença de partículas ferrosas de pequenas dimensões e algumas de grandes dimensões.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 183 200
 Tipo de Desgaste

Observações

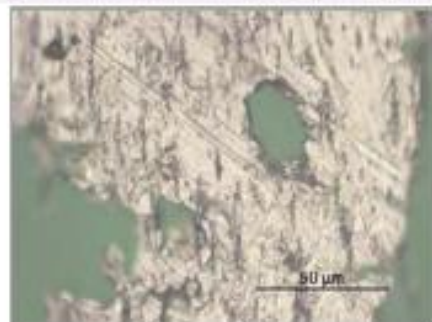
Ampliação da Fotografia ID_foto 182. Presença de partículas ferrosas de pequenas e algumas de grandes dimensões.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 184 1000
 Tipo de Desgaste

Observações

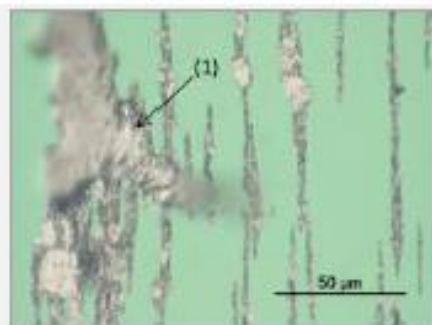
Ampliação da Fotografia ID_foto 183. Detalhe da partícula ferrosa de grandes dimensões. Note-se os orifícios circulares existentes na superfície, que podem ter sido gerados previamente por adesão ou



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 185 1000
 Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 183. Partículas ferrosas de pequenas dimensões, algumas de grandes dimensões e com deformação plástica (1).



ID 43 Máquina Equipamento Horas Máquina

Óleo ESTF ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Esferas Rodagem Horas Óleo 16 Data 28-11-2011

Diluição 1,000 DL 51,1 DS 16,4 CPUC 6,8E+01 ISUC 2,3E+03

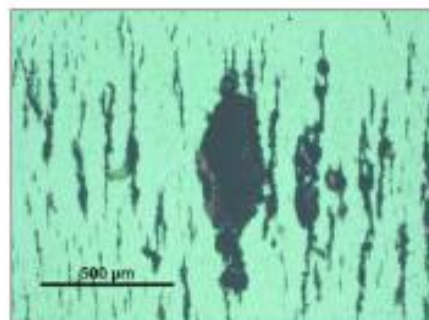
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

186 100

Tipo de Desgaste

Observações

Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões.



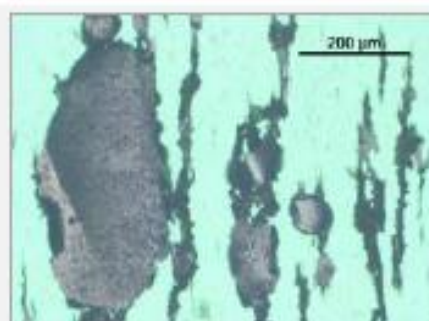
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

187 200

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 186. Presença de partículas ferrosas de pequenas e algumas de muito grandes dimensões.



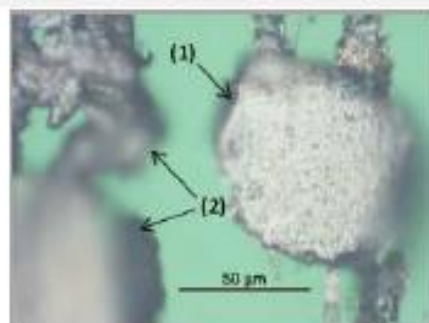
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

188 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 187. Partícula ferrosa de grandes dimensões (1), algumas severamente oxidadas (2).



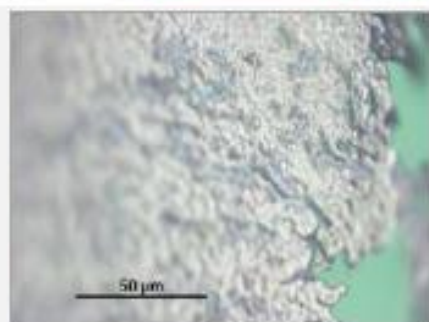
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

189 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 187. Parte da partícula ferrosa de maiores dimensões, que é típica de um desgaste de fadiga avançado.

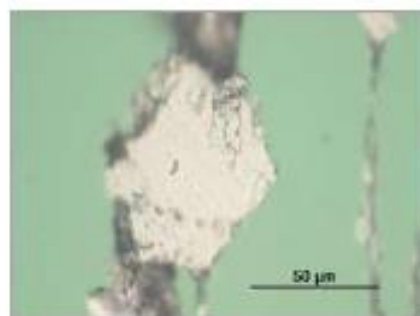


ID 44 Máquina Equipamento Horas Máquina
 Óleo ESTF ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Esferas (80°C) Horas Óleo 5 Data 28-11-2011
 Diluição 1,000 DL 69,4 DS 33,8 CPUC 1,0E+02 ISUC 3,7E+03

ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 190 100
 Tipo de Desgaste

Observações

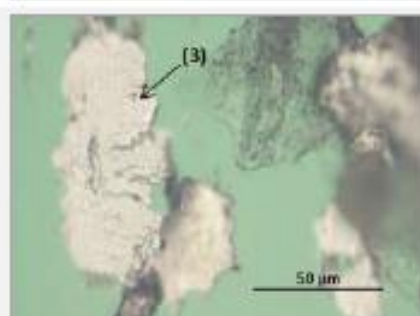
Presença de partículas ferrosas de pPartícula ferrosa de grandes dimensões resultante de desgaste fadiga e adesão.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 191 200
 Tipo de Desgaste

Observações

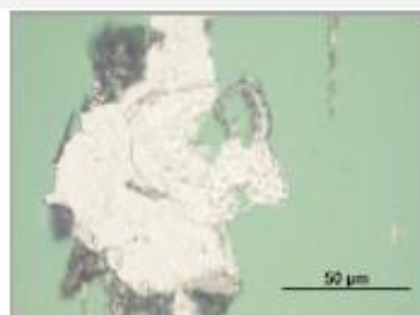
Partículas ferrosas de grandes dimensões, algumas típicas de desgaste de fadiga (3). Ampliação da Fotografia ID_foto 190. Presença de partículas ferrosas de



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 192 1000
 Tipo de Desgaste

Observações

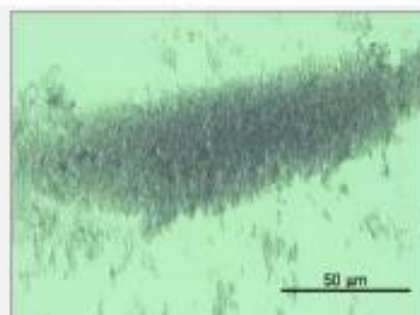
Partícula ferrosa de grandes dimensões resultante de desgaste fadiga e adesão.



ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico
 193 1000
 Tipo de Desgaste

Observações

Presença de algumas partículas de pequenas dimensões, típicas de desgaste de corrosão.



ID 45 Máquina Equipamento Horas Máquina

Óleo ESTR ISO VG 320 Referência Rolamentos Axiais de Esferas Rodagem Horas Óleo 16 Data 20-12-2011

Diluição 0,100 DL 48,5 DS 18,1 CPUC 6,7E+02 ISUC 2,0E+05

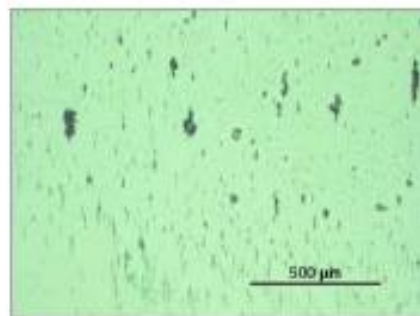
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

194 100

Tipo de Desgaste

Observações

Presença de partículas ferrosas de pequenas e grandes dimensões



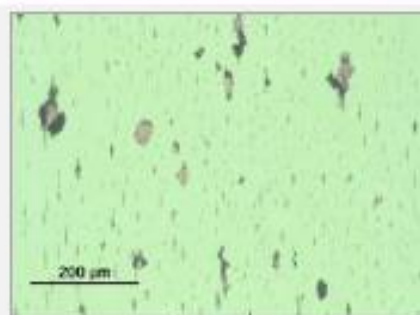
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

195 200

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 194. Presença de partículas ferrosas de pequenas e algumas de muito grandes dimensões.



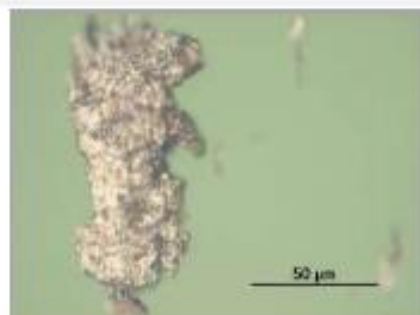
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

196 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia 195. Partícula ferrosa de desgaste de fadiga de grandes dimensões.



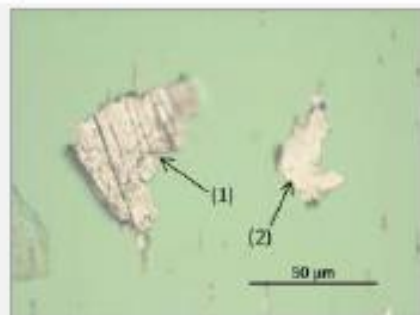
ID_foto Ampliação Localização Luz Tratamento Térmico

197 1000

Tipo de Desgaste

Observações

Ampliação da Fotografia ID_foto 195. Partícula de desgaste de escorregamento (1) e partícula de desgaste de fadiga (2).



ID	46	Máquina	Ensaio Rolamentos	Equipamento	Ensaio	Horas Máquina	
Óleo	ESTR 320	Referência	Rolamentos Axiais de Esferas (80°C)	Horas Óleo	5	Data	20-12-2011
Diluição	0,100	DL	9,3	DS	4,3	CPUC	1,4E+02
		ISUC					6,8E+03

ID_foto	Ampliação	Localização	Luz	Tratamento Térmico
198	100	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	
<p>Observações</p> <p>Presença de partículas ferrosas de pequenas e poucas partículas grandes dimensões.</p>				
				
199	200	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	
<p>Observações</p> <p>Ampliação da Fotografia ID_foto 198. Presença de partículas ferrosas de pequenas e poucas partículas grandes dimensões.</p>				
				
200	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	
<p>Observações</p> <p>Ampliação da Fotografia ID_foto 199. Partículas ferrosas de média dimensão e de pequenas dimensões.</p>				
				
201	1000	Núcleo	Verde / Branca	<input type="checkbox"/>
		Tipo de Desgaste	Outros	
<p>Observações</p> <p>Ampliação da Fotografia ID_foto 199. Partículas ferrosas de pequenas dimensões.</p>				
				

