

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**JOÃO VICTOR XAVIER DE OLIVEIRA
VITOR KERN KOCK**

ANÁLISE DE DESGASTE EM FUSO DE ESFERAS DE RETÍFICAS

CURITIBA

2024

**JOÃO VICTOR XAVIER DE OLIVEIRA
VITOR KERN KOCK**

ANÁLISE DE DESGASTE EM FUSO DE ESFERAS DE RETÍFICAS

Wear analysis in ball screw from Grinding Machine

Trabalho de Conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde
Coorientador: Eng. Dário Luiz Blaskowski

CURITIBA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**JOÃO VICTOR XAVIER DE OLIVEIRA
VITOR KERN KOCK**

ANÁLISE DE DESGASTE EM FUSO DE ESFERAS DE RETÍFICAS

Trabalho de Conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 19 de junho de 2024

Giuseppe Pintaúde
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carlos Henrique da Silva
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gabriela Reis Piazzeta
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2024**

RESUMO

O presente estudo analisa o desgaste em fusos de esferas de retíficas, essenciais para a precisão na fabricação de bicos injetores de diesel. Visto a necessidade de precisão do conjunto, é imprescindível identificar os pontos críticos de desgaste em fusos e castanhas para poder compreender como cada tipo de desgaste contribui para a falha do conjunto e direcionar as soluções de mitigação adequadas. A metodologia de análise do desgaste incluiu: inspeção visual, corte para análises macroscópicas, microscópicas, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X. Os resultados indicam que os principais tipos de desgaste são abrasão e adesão por deformação, com maiores danos observados nos fusos em comparação às castanhas.

Palavras-chave: Abrasão, Adesão, Deformação, Desgaste, Fuso de Esferas.

ABSTRACT

The present study analyzes wear in ball screw from grinding machines, which are essential for precision in the manufacturing of diesel injector nozzles. Given the need for precision in the assembly, it is important to identify the critical wear points in ball screws and nuts to understand how each type of wear contributes to assembly failure and to guide appropriate mitigation solutions. The wear analysis methodology included: visual inspection, sectioning for macroscopic, microscopic analyses, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray spectroscopy. The results indicate that the main types of wear are abrasion, deformation adhesion and the worst damage are observed in the ball screws compared to the nuts.

Keywords: Abrasion, Adhesion, Deformation, Wear, Ball Screw.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Conceitos teóricos abordados na revisão bibliográfica.....	17
Figura 2 - Módulo do fuso de esferas.....	18
Figura 3 - Formas de fusos.....	19
Figura 4 - Castanha simples flangeada FEM-E-S.....	20
Figura 5 - Castanha dupla flangeada FDM-E-S.....	20
Figura 6 - Elementos do sistema tribológico.....	22
Figura 7 - Desenho do sistema tribológico avaliado.....	23
Figura 8 - Desgaste por abrasão.....	23
Figura 9 - Desgaste por adesão.....	24
Figura 10 - Desgaste por fadiga de contato na superfície.....	26
Figura 11 - Falha por pite e lascamento.....	26
Figura 12 - Desgaste por reações tribo-químicas.....	27
Figura 13 - Eixo estacionário.....	30
Figura 14 - Eixo em rotação rápida.....	30
Figura 15 - Diagrama esquemático das alterações no coeficiente de atrito nos limites da lubrificação hidrodinâmica.....	32
Figura 16 - Condições do filme dos regimes de lubrificação.....	34
Figura 17 - Diagrama do coeficiente de atrito para diferentes condições de lubrificação.....	35
Figura 18 - Curva de Stribeck e regimes de lubrificação.....	37
Figura 19 - Exemplos de quatro operações básicas de retificação usando rebolos retos.....	39
Figura 20 - Exemplos de processos de retificação.....	40
Figura 21 - Progresso do desgaste por pite em duas amostras.....	42
Figura 22 - (a) região endurecida e (b) fadiga de contato por elementos rolantes.....	42
Figura 23 - profundidades de análise metalográfica.....	43
Figura 24 - Microestruturas em relação ao canal superior: (a) 1.5 mm da superfície, (b) 3 mm da superfície (c) 4 mm da superfície (d) 4.5 mm da superfície (e) 5 mm da superfície (f) 6.5 mm da superfície.....	43
Figura 25 - Microestrutura em relação ao canal inferior: (a) 1 mm da superfície, (b) 2.5 mm da superfície.....	44
Figura 26 - Aparências externas do rolamento de rolos com falha fornecido no local.....	46
Figura 27 - Macroscopia da pista do anel interno do rolamento de rolos em 3D SM.....	47
Figura 28 - Micrografias em MEV da superfície da pista do anel interno do rolamento.....	48
Figura 29 - Conjunto de fuso de esferas 022 e 029.....	50
Figura 30 - Procedimento experimental.....	53
Figura 31 - Seções para microscopia.....	54
Figura 32 - Macroscopia do conjunto 022.....	56
Figura 33 - Microscopia do conjunto 022.....	57
Figura 34 - Macroscopia do conjunto 029.....	58
Figura 35 - Microscopia do conjunto 029.....	59
Figura 36 - Espectrometria de raio X dos fusos.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de tolerância	21
Quadro 2 - Desvio de passo admissível com curso de 300 mm	21
Quadro 3 - Desvio admissível para o curso nominal	21
Quadro 4 - Classes de pré-tensionamento.....	21
Quadro 5 - Resumo das considerações simplificadoras da hidrodinâmica	31
Quadro 6 - Categorias de lubrificação limite e extrema pressão	36
Quadro 7 - Composição química da graxa Dynalub 510.....	51
Quadro 8 - Composição química da graxa STARBURAGS NBU 12/300 KP	52
Quadro 9 - Especificações da amostra de fuso utilizada	52
Quadro 10 - Vida útil dos fusos analisados	55
Quadro 11 - Resumo dos danos e mecanismos de desgaste	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BASA	<i>Ball Screw Assemblies</i>
CAD	<i>Desenho Assistido por Computador</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CRIN	Centro de Recursos em Informática
Dr	Doutor
Eng.	Engenheiro
et al.	e outros
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PM	Metalurgia do Pó
RFM	<i>Reconfigurable Frequency Measurement</i>
SAE 4340	Aço para construção mecânica
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TEF	<i>Technical Functions</i>
UIN	<i>Unit Injector</i>
UP	<i>Unit Pump</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WZL	<i>Werkzeugmaschinenlabor</i>
XRD	<i>espectroscopia de raios X</i>
3D SM	Estereomicroscopia 3D
CtP	Planta de Curitiba

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem [%]
A_t	Área de contato [m^2]
d	Diâmetro [mm]
d_o	Diâmetro nominal [mm]
D_w	Diâmetro da esfera [mm]
e_p	Medida de limite do percurso nominal [mm]
F	Força de atrito [N]
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
l_u	Percurso útil [mm]
μ	Coefficiente de atrito [adimensional]
μm	Micrômetros
N	Newton
nU/W	Número de Strickeck [adimensional]
P	Passo [mm]
Ra	Rugosidade média [μm]
τ	Esforço de cisalhamento efetivo do material [Pa]
V_{300p}	Desvio de passo admissível com curso de 300 mm [mm]
W	Carga aplicada normal à superfície [N]
$^{\circ}C$	Graus Celsius
Hz	Hertz
mm	Milímetros
M50	Aço liga endurecível por precipitação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Tema	13
1.2	Caracterização do problema	14
1.3	Objetivos	15
1.4	Justificativa	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Fuso de esferas	17
2.1.1	Componentes do conjunto do fuso de esferas	18
<u>2.1.1.1</u>	<u>Fuso de esferas</u>	<u>18</u>
<u>2.1.1.2</u>	<u>Castanha</u>	<u>19</u>
<u>2.1.1.3</u>	<u>Esferas</u>	<u>22</u>
2.2	Sistema tribológico	22
2.3	Tipos de desgaste	23
2.3.1	Desgaste por abrasão	23
2.3.2	Desgaste por adesão	24
2.3.3	Desgaste por fadiga de contato.....	25
2.3.4	Desgaste por reações tribo-químicas	26
2.4	Lubrificação	28
2.4.1	Viscosidade do óleo	28
2.4.2	Regimes de lubrificação	28
<u>2.4.2.1</u>	<u>Lubrificação hidrodinâmica</u>	<u>29</u>
<u>2.4.2.2</u>	<u>Lubrificação Elasto-hidrodinâmica</u>	<u>32</u>
<u>2.4.2.3</u>	<u>Lubrificação Limite</u>	<u>34</u>
<u>2.4.2.4</u>	<u>Lubrificação mista</u>	<u>37</u>
2.5	Retificação	38
2.5.1	Processos básicos de retificação	38
<u>2.5.1.1</u>	<u>Processos de retificação cilíndrica</u>	<u>39</u>
<u>2.5.1.2</u>	<u>Processo de retificação interna</u>	<u>40</u>
3	REVISÃO DA LITERATURA	41
3.1	Métodos de identificação de desgastes em fuso de esferas	41
3.1.1	Métodos diretos	41
3.1.2	Métodos indiretos	44

3.2	Métodos de identificação de desgastes em rolamentos/ mancais de deslizamento.....	45
4	METODOLOGIA	49
4.1	Materiais	49
4.1.1	Castanha	50
4.1.2	Fuso	50
4.1.3	Esfera	51
4.1.4	Lubrificante	51
4.2	Procedimento.....	53
4.2.1	Inspeção visual, desmontagem e limpeza.....	53
4.2.2	Definição dos planos de corte e corte para macroscopia	53
4.2.3	Macroscopia	54
4.2.4	Definição do plano de cortes e cortes para microscopia	54
4.2.5	Análise em microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS).....	54
4.3	Resultados e Discussões	55
4.3.1	Discussão sobre a rastreabilidade dos fusos	55
4.3.2	Análise visual.....	56
4.3.3	Análise de espectrometria de raio X.....	60
4.3.4	Mecanismo de desgaste e causas	62
4.3.5	Síntese dos danos e mecanismos de desgaste	63
5	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico e a crescente necessidade de reduzir emissões de poluentes, como os óxidos de nitrogênio, devido a regulamentações governamentais (CROLLA, 2009), as tolerâncias estão cada vez mais rigorosas na fabricação de componentes automotivos. No contexto dos sistemas de injeção de diesel, que são essenciais para a redução de emissões poluentes, a máxima precisão na fabricação é crucial.

Este trabalho dedica-se a analisar os desgastes em fusos de esferas de retíficas utilizadas em processos de aprimoramento dos componentes do sistema de injeção, visando identificar os pontos críticos de desgaste. Esta pesquisa busca atender às necessidades operacionais imediatas da empresa parceira e promover práticas mais eficazes no processo atual.

1.1 Tema

A necessidade de precisão na fabricação de bicos injetores de diesel é imprescindível para atender às crescentes demandas ambientais e regulatórias. Em um contexto em que a redução das emissões de poluentes atmosféricos é uma prioridade global, os bicos injetores desempenham um papel crítico na eficiência dos motores diesel e na minimização de emissões que agravam o efeito estufa. A precisão na fabricação desses componentes é essencial para garantir a atomização adequada do combustível, o que, por sua vez, resulta em uma queima mais completa e eficiente do diesel.

Para aprimorar e precisar no processo de fabricação, é essencial otimizar as superfícies do bico injetor, regulando com precisão as tolerâncias dimensionais e a rugosidade superficial, entre outras estratégias (ROWE, 2014). Além disso, de acordo com Hecker e Liang (2003), a qualidade superficial determina a vida útil e a efetividade de lubrificação do componente.

Quanto às máquinas de retificação utilizadas na fabricação dos bicos injetores, um dos principais subconjuntos presentes nas retíficas de alta precisão é o fuso de esferas, um elemento essencial para a precisão e eficiência dessas máquinas. Sua principal função é converter o movimento rotativo em linear de forma precisa

(BOSCH REXROTH, 2021). Para isso, são utilizadas esferas para minimizar o atrito e proporcionar uma resposta imediata aos comandos.

Devido à sua relevância para o funcionamento das retíficas, as falhas nos fusos de esferas podem resultar em interrupções na produção e na qualidade das peças usinadas. Diversas causas podem contribuir para essas falhas, incluindo a sobrecarga do sistema, desalinhamento, desgaste excessivo das esferas e das pistas, contaminação por partículas abrasivas, lubrificação inadequada e até mesmo defeitos de fabricação ou montagem dos fusos (BOSCH REXROTH, 2021).

1.2 Caracterização do problema

Para a fabricação de bicos injetores, é de suma importância a utilização de retíficas de alta precisão para promover a remoção do material por meio do uso dos rebolos abrasivos que atuam nas superfícies das peças. Isso se deve porque estes componentes admitem tolerâncias muito baixas, como a guia do bico da agulha que apresenta uma folga micrométrica (ROBERT BOSCH GMBH, 2006). No entanto, as retíficas utilizadas no processo de retificação de *Unit Injector* (UIN), *Common-Rail Injector* (CRIN) e *Unit Pump* (UP) da empresa parceira vêm apresentando alguns problemas na eficiência e na durabilidade dos fusos de esferas.

De acordo com a empresa parceira, a causa de descarte para os conjuntos investigados nesse trabalho é a folga excessiva entre as esferas e o fuso, o que impede o correto funcionamento da retífica. O ponto focal do problema se manifesta quando a máquina de retificação opera em curso de trabalho reduzido, ou seja, o curso é inferior ou igual ao comprimento da Castanha L, conforme o manual do fabricante, principalmente no UIN e CRIN, que apresentam amplitudes de 5 a 6 mm no seu processo de fabricação. Sendo essa uma informação conhecida pela empresa, surgiu a hipótese de que a rotação das esferas no fuso ocorra de maneira incompleta, o que poderia gerar uma pressão lateral e resultar em contatos metálicos desprovidos de lubrificação adequada. Tal problema se mostra de maneira menos evidente em cenários de cursos longos, como na retificação do componente UP, onde possivelmente as esferas têm rotação e imersão total no fluido lubrificante. Outra hipótese é a falta de um sistema de alimentação de lubrificante dedicado ao fuso de esferas, visto que a única lubrificação disponível é a aplicada pelo fabricante, que recomenda que, mesmo em condições normais de funcionamento, o sistema precisa

ser relubrificado em, no máximo, 2 anos, devido à degradação do fluido lubrificante (BOSCH REXROTH, 2021).

Os impactos desses fatores não se limitam apenas a falhas prematuras dos fusos de esferas, mas também afetam a qualidade das peças produzidas, provocam perda de carga, folga, necessidade de troca de rebolos, entre outros problemas. Portanto, uma análise de falhas nos fusos de esferas das retíficas é crucial para compreender a natureza específica desses problemas e, mais importante ainda, para desenvolver estratégias eficazes de mitigação.

1.3 Objetivos

O objetivo deste estudo é compreender e identificar de maneira abrangente as causas de desgastes em fusos de esferas das retíficas durante a retificação interna de bicos injetores.

No âmbito desta pesquisa, almeja-se conduzir uma análise de falhas nos fusos de esferas, com a finalidade de identificar os pontos críticos de desgaste. Além disso, busca-se estabelecer correlações entre os indícios de falha identificados e as causas raízes. Pretende-se atribuir especial ênfase à investigação da precária lubrificação dos fusos, motivada pelos fatores previamente mencionados.

Para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar um estudo detalhado, utilizando técnicas de análise macro e microscópicas, para determinar os mecanismos de desgaste (como abrasão, adesão, fadiga, corrosão) presentes nos fusos e castanhas. A fim de compreender como cada tipo de desgaste contribui para a falha do componente e direcionar as soluções de mitigação adequadas.
- Examinar a presença de contaminantes externos (como partículas metálicas ou resíduos) no sistema de lubrificação e sua influência no desgaste dos fusos, para determinar se a contaminação externa é uma causa significativa do desgaste prematuro e, assim, implementar medidas para controlar ou eliminar esses contaminantes.

- Utilizar os dados obtidos nas análises para identificar as possíveis causas de desgaste, considerando fatores como condições de operação, qualidade do material dos fusos, e eficácia da lubrificação, para fornecer uma base sólida para a compreensão das causas raízes do desgaste e orientar intervenções específicas.

1.4 Justificativa

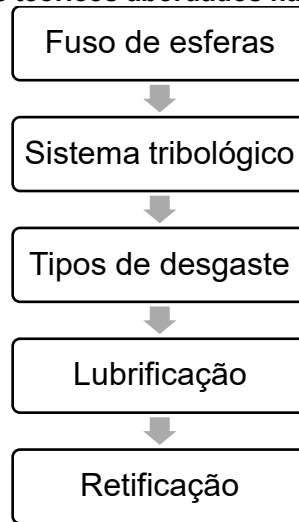
A realização de um estudo focado na análise de desgastes em fuso de esferas das retíficas surge como uma iniciativa estratégica para atender às necessidades críticas da empresa. Esta pesquisa não apenas aborda um problema imediato na operação, mas também propõe soluções concretas e direcionadas, alinhadas aos objetivos de análise de falhas, eficiência, durabilidade e competitividade no cenário industrial.

Ao identificar os mecanismos de desgaste que afetam os fusos de esferas, a empresa poderá implementar práticas de manutenção mais eficazes e evitar custos associados à substituição frequente de componentes. Além disso, a qualidade e precisão das peças produzidas impactarão diretamente na redução do número de refugos gerados e no tempo de inatividade das máquinas, resultando em um aumento da produtividade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo é destinado para a definição dos conceitos teóricos que se fazem necessários para a realização do estudo. Os tópicos abordados, na ordem lógica definida para este estudo, são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Conceitos teóricos abordados na revisão bibliográfica

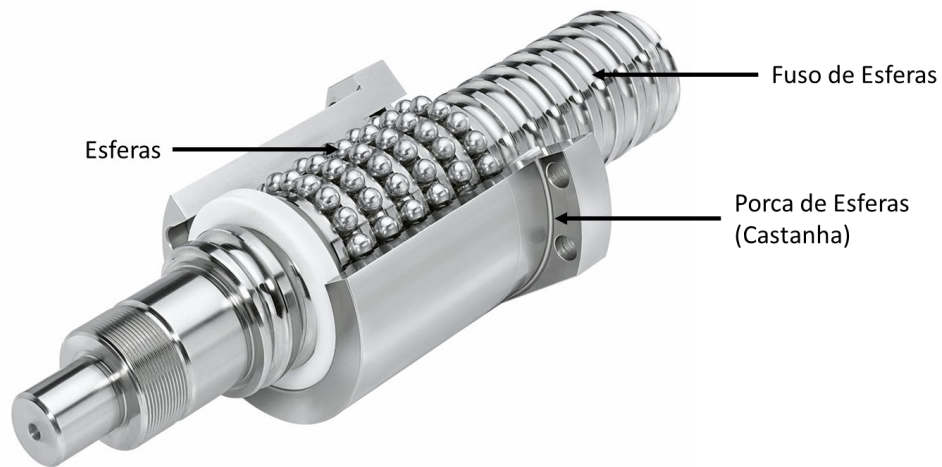


Fonte: Autoria própria (2023)

2.1 Fuso de esferas

Os fusos de esferas, também conhecidos como fusos de esferas recirculantes, representam um dos métodos mais eficazes para converter movimento rotativo ou torque em movimento linear e vice-versa. Este sistema é composto por um eixo de parafuso chamado de fuso de esferas, uma castanha (ou porca) e esferas, conforme ilustrado na Figura 2. A combinação desses elementos resulta em alta eficiência mecânica devido à baixa fricção das esferas enquanto se movem dentro da castanha. (HIWIN, 2014).

Figura 2 - Módulo do fuso de esferas



Fonte: Adaptado de Kalatec (2023)

Apesar da simplicidade na descrição das funções elementares do fuso, na prática, há uma grande diversidade de versões e várias exigências. (BOSCH REXROTH, 2021). Além disso, uma série de benefícios torna o uso de fusos vantajoso em relação a outros sistemas, como alta precisão, rigidez, reversibilidade, eficiência e entre outras vantagens. (HIWIN, 2014).

Devido à grande precisão e às vantagens mencionadas anteriormente, esse componente encontra diversas áreas de aplicação, tais como: máquinas CNC, máquinas industriais, eletrônicas e de transporte, além de máquinas-ferramentas de precisão, como as retificadoras, que são o objeto de estudo deste trabalho. (HIWIN, 2014).

2.1.1 Componentes do conjunto do fuso de esferas

2.1.1.1 Fuso de esferas

O eixo roscado, conhecido como fuso de esferas ou de precisão, está disponível em uma variedade de diâmetros nominais (mm), passos (mm), sentidos do passo da rosca (R para direita e L para esquerda) e diâmetros das esferas (mm). As formas dos fusos oferecem uma ampla gama de opções de escolha, dependendo das necessidades de aplicação. Alguns exemplos podem ser vistos na Figura 3. (BOSCH REXROTH, 2021).

Figura 3 - Formas de fusos



Fonte: Bosch Rexroth (2021)

É importante considerar os seguintes critérios ao selecionar um fuso de esferas, conforme o catálogo do fabricante Bosch Rexroth (2021):

- Grau de precisão necessário (desvio de passo).
- Carga aplicada.
- Vida útil esperada.
- Velocidade crítica.
- Capacidade de carga de flambagem.
- Rigidez ou folga permitida.
- Velocidade característica (máxima velocidade linear permitida).

2.1.1.2 Castanha

As castanhas são componentes essenciais nos fusos de esferas, responsáveis pela interação direta com o eixo e as esferas. Existem diferentes modelos de castanhas dentro dos tipos de castanhas simples e duplas, cada uma projetada para aplicações específicas. (BOSCH REXROTH, 2021).

No mercado de fusos é possível encontrar dois tipos de castanhas:

- a) **Castanhas simples:** São unidades básicas que oferecem uma solução econômica e eficiente para muitas aplicações. Elas podem ser flangeadas ou cilíndricas, e são projetadas para oferecer baixo atrito e alta precisão, conforme ilustrada pela Figura 4 (BOSCH REXROTH, 2021).

Figura 4 - Castanha simples flangeada FEM-E-S



Fonte: Bosch Rexroth (2021)

- b) **Castanhas duplas:** São projetadas para aplicações que requerem maior estabilidade e capacidade de carga. Elas consistem em duas unidades de castanha que trabalham em conjunto para proporcionar maior rigidez e menor folga axial. São usadas em máquinas-ferramenta e outras aplicações industriais onde a precisão e a estabilidade são críticas, conforme ilustrada pela Figura 5 (BOSCH REXROTH, 2021).

Figura 5 - Castanha dupla flangeada FDM-E-S



Fonte: Bosch Rexroth (2021)

As castanhas ajustáveis, tanto simples quanto duplas, permitem ajustes finos na pré-carga para eliminar folgas e melhorar a rigidez do sistema. Esse ajuste é vital em aplicações de alta precisão, onde a mínima folga pode afetar significativamente o desempenho.

Com relação às especificações de eixos e castanhas, duas características fundamentais merecem destaque, ambas desempenhando papéis fundamentais no desempenho e na precisão do sistema. Essas especificações são a classe de tolerância e a classe de pré-carga, elementos que influenciam diretamente na capacidade do fuso em fornecer resultados consistentes e no controle refinado durante o processo de retificação.

A classe de tolerância pode variar entre T3, T5, T7 e T9, conforme os Quadro 1 e Quadro 2. Essa designação é responsável por evidenciar a capacidade

intrínseca desses fusos em proporcionar resultados consistentes. Quanto menor o número da classe de tolerância, maior a precisão da castanha no encaixe com o fuso.

Quadro 1 - Classes de tolerância

Classe de Tolerância	Definição
3	Tolerância restrita, alta precisão.
5	Tolerância média, equilíbrio entre precisão e produção.
7	Tolerância mais ampla, adequada para aplicações menos críticas
9	Tolerância ampla, utilizada em aplicações onde a precisão não é crucial

Fonte: Adaptado de Bosch Rexroth (2021, p. 134)

Quadro 2 - Desvio de passo admissível com curso de 300 mm

Classe de tolerância	v_{300p} (μm)		
	3	5	7
12	23	52	130

Fonte: Bosch Rexroth (2021, p. 134)

Quadro 3 - Desvio admissível para o curso nominal

Curso útil l_u	Tolerância para o curso nominal e_p (μm)					
	Classe de tolerância					
	>	\leq	3	5	7	9
0		100	8	18	44	110
100		200	10	20	48	120
200		315	12	23	52	130
315			$e_p = \frac{l_u}{300} \cdot v_{300p}$			

Fonte: Bosch Rexroth (2021, p. 134)

A classe de pré-carga é um fator determinante na sensibilidade do sistema. O Quadro 4 oferece as opções disponíveis pelo fabricante Bosch Rexroth. Isso permite um controle refinado no processo de retificação, sendo particularmente relevante para garantir a precisão necessária no funcionamento do fuso.

Quadro 4 - Classes de pré-tensionamento

Opção	Classe de pré-carga	Definição
0	C0	Folga axial padrão
1	C00	Folga axial reduzida
2	C3	Pré-carga alta (Castanha simples)
3	C1	Pré-carga leve (Castanha simples)
4	C4	Pré-carga alta (Castanha dupla)
5	C5	Pré-carga média (Castanha dupla)
6	C2	Pré-carga média (Castanha simples)

Fonte: Bosch Rexroth (2021, p. 30)

2.1.1.3 Esferas

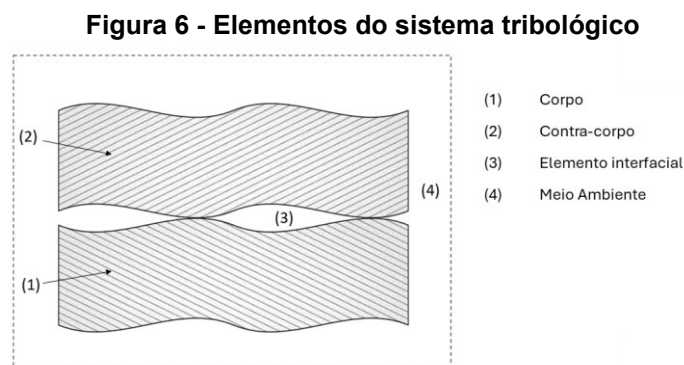
De acordo com a Bosch Rexroth (2021), as esferas são os elementos de rolamento que permitem o movimento suave e preciso entre o eixo e a castanha. A qualidade e o material das esferas são cruciais para o desempenho geral do fuso de esferas. Esferas de alta precisão e resistência ao desgaste são essenciais para garantir a durabilidade e a eficiência do sistema.

2.2 Sistema tribológico

De acordo com a ASTM G40-17, um sistema tribológico é qualquer sistema que contém um ou mais elementos tribológicos, incluindo a interação com fatores físicos, químicos e ambientais. Cada elemento tribológico é composto por duas ou mais superfícies sólidas que estão em contato, estando sujeitas a desgaste por abrasão, deslizamento ou até cavitação.

Para ocorrer desgaste, é necessário que duas ou mais superfícies estejam em contato. Nesse sentido, define-se como sistema tribológico o arranjo físico entre componentes, levando em conta os materiais dos componentes e o ambiente de interação entre os elementos (BLAU, 2017).

Cada sistema tribológico pode ser dividido em quatro elementos, que são apresentados na Figura 6.

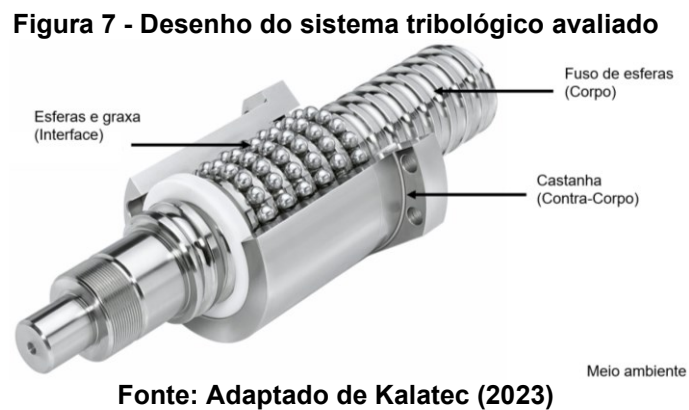


Fonte: Adaptado de Pintaúde (2021)

O corpo e contra-corpo são os elementos sujeitos ao desgaste quando em contato, e as características dos materiais desses elementos (por exemplo, a dureza) afetam a magnitude do desgaste que sofrem. O elemento interfacial é o espaço entre o corpo e o contra-corpo, podendo ser ocupado por um lubrificante. O meio ambiente,

por sua vez, estabelece as condições de trabalho dos componentes, como temperatura e presença de agentes químicos que podem causar desgaste por reações triboquímicas.

No sistema estudado, o sistema tribológico é composto pelo fuso de esferas (corpo), esferas e graxa (interface) e castanha (contra-corpo). A Figura 7 exemplifica o sistema tribológico:

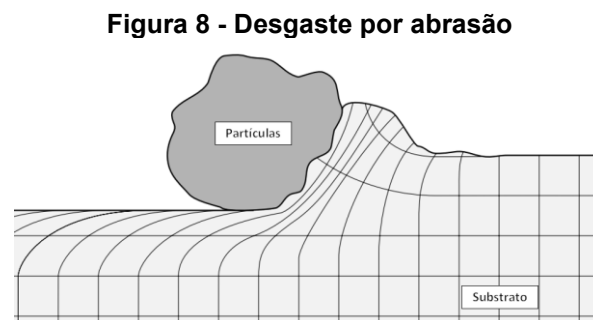


2.3 Tipos de desgaste

Conhecer os tipos de desgaste é fundamental para a análise de falhas envolvendo componentes móveis. Os principais tipos são: abrasão, adesão, fadiga de contato e reações triboquímicas.

2.3.1 Desgaste por abrasão

De acordo com Zum Gahr (1987), o desgaste por abrasão é a perda de material devido à ação de partículas duras, como abrasivos, que entram em contato com a superfície do material, conforme ilustrado na Figura 8.



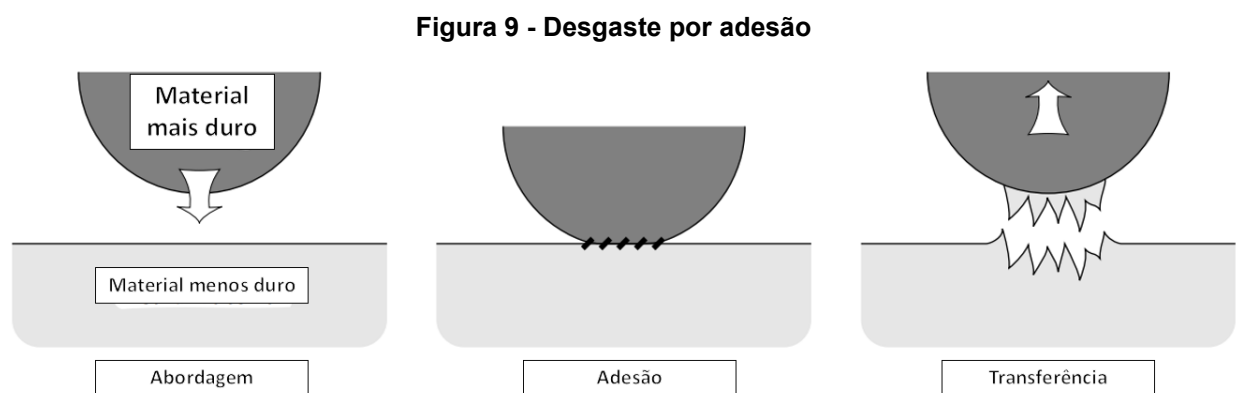
De acordo com Stachowiak e Batchelor (2013), os mecanismos de desgaste por abrasão incluem corte, fratura, fadiga por deformação de partículas e separação de grãos. No desgaste por corte, as partículas deslizam sobre a superfície, removendo material. No desgaste por fratura, as partículas penetram na superfície, criando trincas no substrato que resultam na remoção de material, especialmente quando as partículas são afiadas.

O mecanismo de fadiga por deformações de partículas subsequentes ocorre pelo esforço repetido perpendicular à superfície por partículas no substrato, causando deformação. Este é um processo de desgaste mais lento que os demais.

O mecanismo de separação do grão é raro, majoritariamente encontrado em cerâmicas. Ele ocorre no contato de partículas paralelas à superfície com grãos grandes e com ligações fracas entre si.

2.3.2 Desgaste por adesão

Para Zum Gahr (1987), adesão é o fenômeno de união e transferência de material entre duas superfícies em contato, geralmente devido à força intermolecular. De acordo com Stachowiak e Batchelor (2013), esse tipo de desgaste pode ocorrer na maioria dos sólidos, mas camadas de oxigênio, óleo e água na interface, assim como a aspereza e dureza dos corpos, suprimem a adesão. Desse modo, estudos envolvendo adesão costumam utilizar câmaras de vácuo. A Figura 9 mostra de forma esquemática o desgaste por adesão.



Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2013)

Na Figura 9 é possível observar três estágios do desgaste por adesão: a abordagem, em que um material mais duro se aproxima de um menos duro; a adesão, que é quando ocorre o contato; e a transferência, em que o material mais duro leva consigo parte do material menos duro.

Stachowiak e Batchelor (2013) dividem o desgaste por adesão em metal-metal, metal-polímero, metal-cerâmico e polímero-polímero/cerâmico-cerâmico.

A adesão metal-metal depende da combinação de materiais e da compatibilidade entre eles. Por exemplo, o material que apresenta maior adesão ao ferro é o próprio ferro, e o mecanismo de desgaste é o contato dos elétrons livres, possibilitando a transferência entre eles. Fatores como a estrutura cristalina (hexagonal compacta sofre menos adesão que as demais), o módulo de elasticidade (quanto maior, menos adesão) e a alta energia de superfície suprimem a adesão nos materiais envolvidos. A reatividade química dos metais também contribui para a adesão. No entanto, metais nobres como o ouro e a platina não formam a camada de óxido que surge nos demais metais e tendem a ter uma adesão maior.

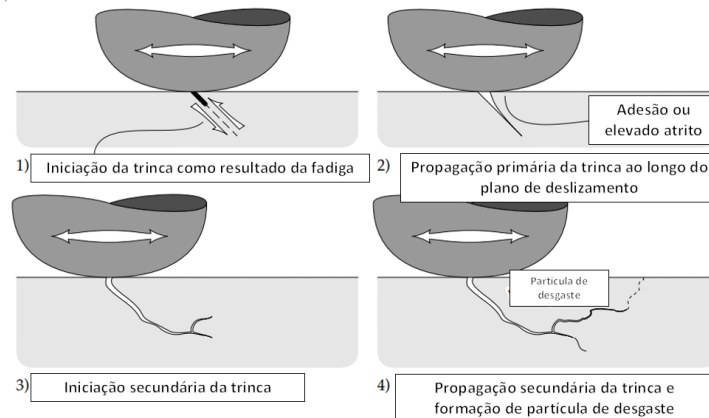
Na adesão metal-polímero e metal-cerâmico, o mecanismo de adesão ocorre majoritariamente pela interação química. Já na adesão polímero-polímero e cerâmico-cerâmico, o principal mecanismo de desgaste são as forças de Van der Waals.

2.3.3 Desgaste por fadiga de contato

A fadiga de contato é causada pela aplicação repetida de tensões, resultando na separação do material (ZUM GAHR, 1987). Para Stachowiak e Batchelor (2013), a fadiga de contato gera deformação da superfície, e o acúmulo dessa deformação cria concentradores de tensão, que formam trincas na superfície e na subsuperfície.

A Figura 10 mostra o mecanismo de desgaste por fadiga de contato na superfície.

Figura 10 - Desgaste por fadiga de contato na superfície

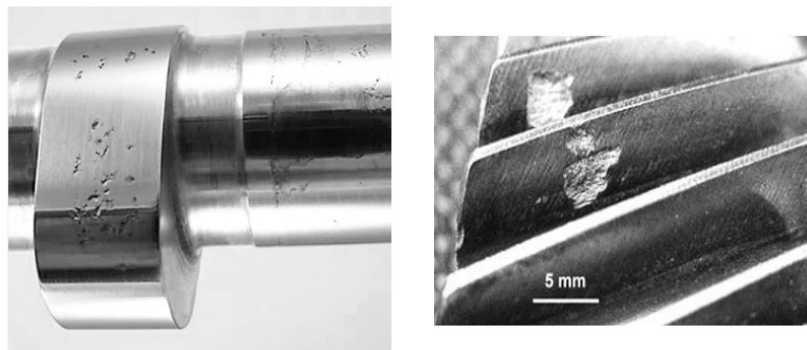


Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2013)

Quatro etapas são mostradas na Figura 10: primeiro ocorre a iniciação da trinca devido ao contato repetido de corpos sólidos. A propagação da trinca ocorre ao longo do plano de deslizamento, devido à adesão ou alto atrito. Na terceira etapa, uma segunda trinca é desenvolvida a partir da primeira ou de outra trinca subsuperficial, ocorrendo uma conexão entre duas trincas. Por fim, a trinca secundária é propagada e uma partícula de desgaste é liberada.

Sinais típicos de fadigas de contato são os pites e os lascamentos, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Falha por pite e lascamento



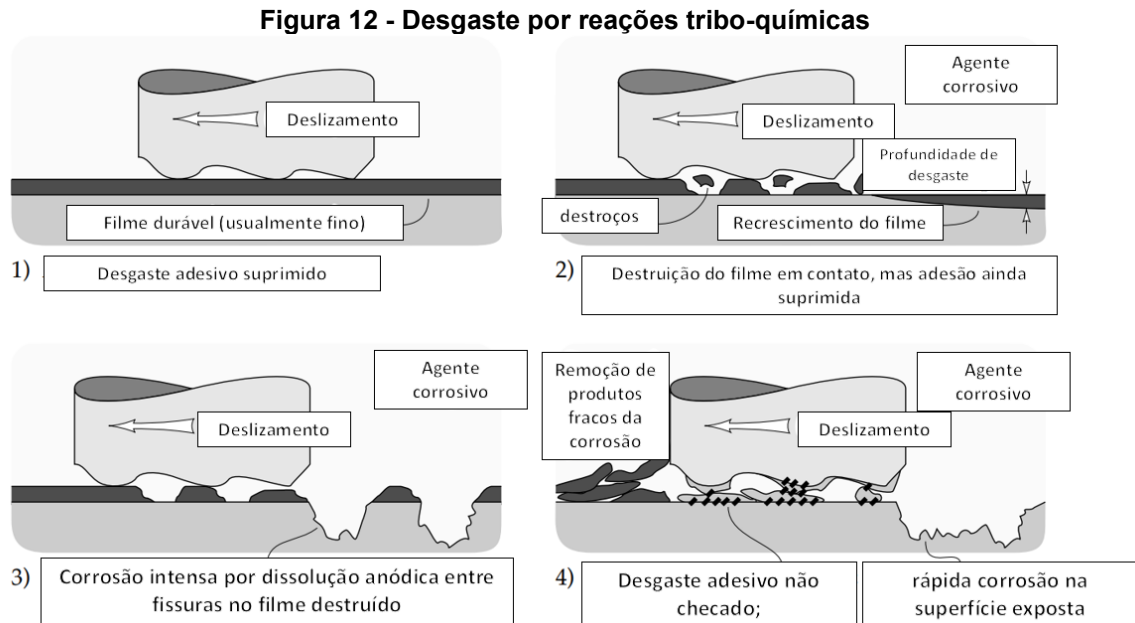
Fonte: Pintaúde (2021)

2.3.4 Desgaste por reações tribo-químicas

De acordo com Zum Gahr (1987), reações triboquímicas são resultados de interações entre os elementos químicos no ambiente, resultando em desgaste.

Segundo Stachowiak e Batchelor (2013), o desgaste por reações triboquímicas é acompanhado pela redução no atrito, o que facilita sua identificação.

Superfícies metálicas com camadas de óxido, embora previnam adesão, podem favorecer o desgaste por reações triboquímicas e precisam ser avaliadas. A Figura 12 apresenta quatro modelos de desgaste por reações tribo-químicas.



Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2013)

O primeiro modelo é a formação de um filme durável, que, se for mantido, não haverá desgaste adesivo nem corrosivo. O segundo modelo é a corrosão do filme em contato no deslizamento, sendo a forma mais comum de desgaste por corrosão. O terceiro modelo ocorre em meios altamente corrosivos. Por fim, o quarto ocorre em meios extremamente corrosivos, em que os produtos da corrosão são solúveis no meio líquido.

A intensidade da corrosão é afetada pela concentração do agente corrosivo (uma pequena fração de água no agente corrosivo contribui para a corrosão), pela temperatura (aumentando) e pela presença de inibidores de corrosão.

Outro ponto que Stachowiak e Batchelor (2013) apresentam é a relação entre desgaste adesivo e corrosivo. Um lubrificante pouco corrosivo contribui para a adesão, pois os óxidos que protegem o material não se formam. Também é analisado o efeito da abrasão, que contribui para o aumento do desgaste triboquímico, pois é responsável pela remoção dos filmes que protegem o material.

2.4 Lubrificação

Numa abordagem inicial sobre lubrificação, de acordo com Stachowiak e Batchelor (2013) é imprescindível compreender a principal função dos lubrificantes no controle do atrito e do desgaste em sistemas específicos, bem como as interações físicas e químicas entre o lubrificante e as superfícies de lubrificação para que os elementos da máquina tenham uma vida útil satisfatória. (HAMROCK, 1991).

As propriedades físicas fundamentais dos lubrificantes constituem um elemento fundamental nesse contexto. Fatores como viscosidade e temperatura da viscosidade são papéis determinantes na eficácia do lubrificante.

2.4.1 Viscosidade do óleo

Um fator imprescindível que se destaca neste contexto de lubrificação é a viscosidade do óleo, a qual varia significativamente com mudanças na temperatura, taxa de cisalhamento e pressão. A espessura do filme de óleo gerado normalmente guarda proporção com a viscosidade. A princípio, pode-se inferir que óleos mais viscosos ofereceriam um desempenho superior, uma vez que geram filmes mais espessos, promovendo uma separação mais eficaz entre as superfícies em contato. Contudo, Stachowiak e Batchelor (2013) apresentam que essa suposição não se mantém verdadeira para todos os casos, pois óleos mais viscosos demandam mais potência para serem cisalhados. Esse aumento na demanda de energia resulta em perdas significativas de potência e geração adicional de calor. Essa elevação relativa na temperatura das superfícies de contato pode, em alguns cenários, contribuir para o comprometimento da integridade do sistema e falhas nos componentes. Portanto, a compreensão aprofundada das características viscosas dos lubrificantes é essencial tanto no design quanto na previsão do comportamento de sistemas mecânicos lubrificados.

2.4.2 Regimes de lubrificação

Os regimes de lubrificação são caracterizados principalmente pelo coeficiente de atrito e pela espessura do filme de lubrificante, e são subdivididos em quatro categorias (HAMROCK et al., 2004; TORBACKE et al., 2014):

- a) **Regime hidrodinâmico (*hydrodynamic lubrication*):** as superfícies estão completamente separadas pelo lubrificante em um processo hidrodinâmico.
- b) **Regime elasto-hidrodinâmico (*elastohydrodynamic lubrication*):** caracterizado por um filme de lubrificante menos espesso que transmite deformações elásticas entre as superfícies.
- c) **Regime de lubrificação limite (*boundary lubrication*):** onde a espessura do filme de lubrificante é reduzida a ponto de ocorrer contato direto entre as superfícies.
- d) **Regime de lubrificação mista (*mixed lubrication*):** destaca-se pela coexistência dos regimes elasto-hidrodinâmico e limite.

2.4.2.1 Lubrificação hidrodinâmica

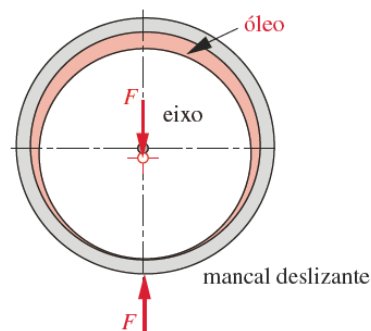
A lubrificação hidrodinâmica é um fenômeno no qual um filme completo de lubrificante é gerado entre duas superfícies em movimento relativo, criando uma separação que reduz significativamente o atrito e o desgaste. Este conceito foi amplamente fundamentado por Osborne Reynolds no final do século XIX (HAMROCK, 1991). Segundo Stachowiak e Batchelor (2013), a lubrificação hidrodinâmica ocorre quando duas condições principais são atendidas:

- a) **Movimento Relativo com Velocidade Suficiente:** As superfícies em contato devem mover-se relativamente uma à outra com uma velocidade adequada para permitir a formação de um filme lubrificante capaz de suportar cargas.
- b) **Inclinação das Superfícies:** As superfícies devem estar inclinadas em relação uma à outra. Se forem paralelas, não se formará um campo de pressão no filme lubrificante para suportar a carga necessária. A pressão desenvolvida (geralmente inferior a 5 MPa) não costuma ser suficiente para causar uma deformação elástica significativa das superfícies (HAMROCK, 1991).

O regime de lubrificação hidrodinâmica é particularmente relevante durante a inicialização e encerramento da operação de uma máquina. Durante estes momentos, a velocidade e a carga aplicadas promovem a formação de uma camada de óleo entre o eixo e a superfície do mancal. Na teoria, este processo visa eliminar o atrito e o desgaste, enquanto na prática utiliza a camada de óleo para elevar a superfície de contato do mancal, minimizando o risco de contato direto.

Quando o mancal de deslizamento está em posição estacionária, o eixo está sob uma carga normal coincidente com a parte baixa do mancal, causando contato metálico e concentrando o lubrificante ao redor. Durante o funcionamento com velocidade angular significativa, a linha de centro do eixo desloca-se dentro do mancal, eliminando o contato metálico e concentrando a camada de lubrificante entre o eixo e o mancal, conforme ilustrado em Norton (2013).

Figura 13 - Eixo estacionário



Fonte: Norton (2013)

Figura 14 - Eixo em rotação rápida



Fonte: Norton (2013)

Conforme Stachowiak e Batchelor (2013), algumas considerações sobre o mecanismo de lubrificação hidrodinâmica são resumidas no Quadro 5:

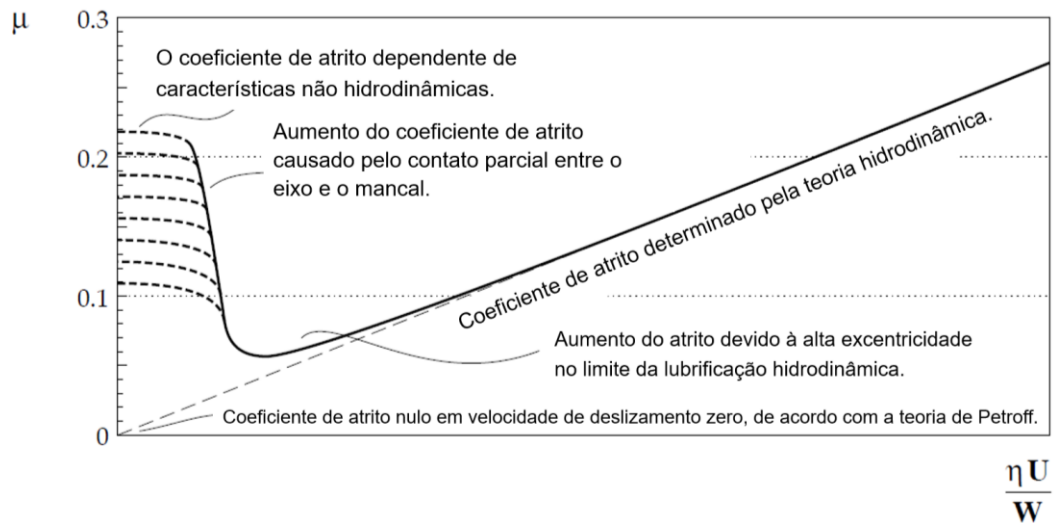
Quadro 5 - Resumo das considerações simplificadoras da hidrodinâmica

Nº	Considerações	Comentário
1	As forças do corpo são desprezadas.	Sempre válido, pois não há campos externos de forças atuando sobre os fluidos, com exceção dos fluidos magneto-hidrodinâmicos e suas aplicações.
2	A pressão é constante através do filme.	Sempre válido, pois a espessura dos filmes hidrodinâmicos está na faixa de vários micrômetros. Pode haver algumas exceções, no entanto, com filmes elásticos.
3	Nenhum deslizamento nos limites.	Sempre válido, pois a velocidade da camada de óleo adjacente ao limite é a mesma que a do limite.
4	O lubrificante se comporta como um fluido newtoniano.	Normalmente válido com algumas exceções, por exemplo, óleos poliméricos.
5	O Fluido é luminar.	Normalmente válido, exceto em rolamentos grandes, por exemplo, turbinas.
6	A inércia do fluido é desprezada.	Válido para baixas velocidades de rolamento ou altas cargas. Efeitos de inércia são incluídos em análises mais exatas
7	A densidade do fluido é constante.	Geralmente válido para fluidos quando não há muita expansão térmica. Definitivamente não é válido para gases.
8	A viscosidade é constante em todo o filme de fluido gerado.	Suposição grosseira, mas necessária para simplificar os cálculos, embora isso não seja verdade. A viscosidade não é constante em todo o filme gerado.

Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2013)

A partir das considerações do Quadro 5, é possível afirmar que a lubrificação hidrodinâmica é eficaz quando existe uma velocidade de deslizamento adequada. À medida que a velocidade de deslizamento é reduzida, a espessura do filme também diminui para manter o campo de pressão. Esta condição, onde o filme hidrodinâmico ainda suporta a maior parte da carga, mas não evita completamente algum contato entre as superfícies, é conhecida como lubrificação limite. Os limites da lubrificação hidrodinâmica são resumidos no diagrama esquemático mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Diagrama esquemático das alterações no coeficiente de atrito nos limites da lubrificação hidrodinâmica



Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2013)

O diagrama acima apresenta a relação entre a velocidade de deslizamento, os parâmetros de atrito (μ) e o número de Stribeck (nU/W), que é utilizado para descrever a eficiência de lubrificação em mancais de deslizamento ou rolamentos. Quando um valor crítico abaixo desse parâmetro é atingido, o atrito aumenta drasticamente, indicando o fim da lubrificação hidrodinâmica (CAMERON, 1966).

A eficácia da lubrificação hidrodinâmica depende da escolha adequada da viscosidade do óleo para manter a condição hidrodinâmica em todas as operações. Um óleo com viscosidade muito alta pode reduzir a eficiência operacional ao aumentar a resistência das moléculas de óleo, resultando em aumento de temperatura (NORTON, 2013).

2.4.2.2 Lubrificação Elasto-hidrodinâmica

A lubrificação elasto-hidrodinâmica (EHL) é uma forma avançada de lubrificação hidrodinâmica que considera a deformação elástica das superfícies em contato e as alterações na viscosidade do lubrificante sob pressão como elementos fundamentais (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013). Neste regime, a elasticidade influencia não apenas a capacidade de carga e o atrito, mas também a viscosidade, que é afetada pela pressão. A curva de uma esfera ou rolo de um rolamento e a pista de rolamento é bastante diferente. Devido à área de contato ser muito pequena, a pressão do óleo naquele ponto aumenta acentuadamente.

Esta alta pressão aumenta a viscosidade do óleo consideravelmente e sua habilidade de suportar cargas (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013). Esta carga concentrada pode deformar levemente o metal da esfera ou rolo e da pista na zona de contato. Esta deformação acontece apenas na zona de contato, e o metal volta à sua forma normal elasticamente uma vez que a rotação continua. A metalurgia e o tratamento térmico do metal são muito importantes para este regime de lubrificação. A viscosidade do óleo é diretamente afetada pela temperatura, e temperaturas de operação anormais ou incorretas interferem na formação do filme de lubrificação elasto-hidrodinâmica (NORIA, 2017).

Esse regime, conhecido como lubrificação elasto-hidrodinâmica, opera efetivamente em filmes de óleo extremamente finos, na faixa de 0,1 a 1 μm , separando as superfícies em contato e reduzindo significativamente o desgaste e o atrito. Está sujeita a extremos de pressão e cisalhamento (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Os três seguintes efeitos desempenham um papel importante na formação de filmes de lubrificação na lubrificação elasto-hidrodinâmica:

- a) **Formação do Filme Hidrodinâmico:** Este efeito refere-se à criação do filme de lubrificação devido à ação hidrodinâmica, onde o movimento relativo das superfícies provoca a formação de um filme lubrificante entre elas.
- b) **Modificação da Geometria do Filme pela Deformação Elástica:** A deformação elástica das superfícies em contato influencia a geometria do filme de lubrificação. A elasticidade das superfícies afeta a espessura e a forma do filme gerado.
- c) **Transformação da Viscosidade e Reologia do Lubrificante sob Pressão:** Sob pressão, ocorre uma transformação na viscosidade e na reologia do lubrificante. Essa mudança é crucial para a eficácia do mecanismo elasto-hidrodinâmico de lubrificação.

A condição de lubrificação elasto-hidrodinâmica depende das deflexões elásticas das superfícies e das pressões elevadas (100 a 500 kpsi) dentro da zona de contato, que aumentam significativamente a viscosidade do fluido. Para evitar o contato áspero e obter uma lubrificação de filme completo, a rugosidade superficial média deve ser inferior a 1/2 ou 1/3 da espessura do filme de óleo, que normalmente

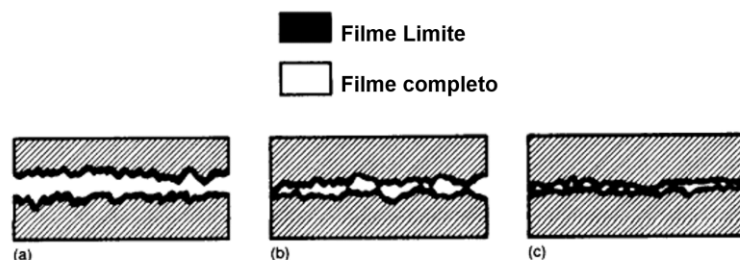
é da ordem de 1 μm . Em condições de carga elevada ou baixa velocidade, a espessura do filme EHL pode ser insuficiente para separar as asperezas da superfície, resultando em condições de filme misto ou de contorno. Esses fatores incluem o aumento da velocidade relativa, a viscosidade do lubrificante e o raio de curvatura no ponto de contato, que são cruciais para a formação das condições de EHL (NORTON, 2013).

2.4.2.3 Lubrificação Limite

O regime a seguir pode ser denominado 'lubrificação de contorno (*boundary lubrication*)' ou 'lubrificação de limite e extrema pressão (*boundary and extreme-pressure lubrication*)'. Esse regime está associado ao contato metal-metal entre duas superfícies deslizantes em máquinas. A lubrificação limite é uma condição crucial em muitas aplicações práticas, especialmente quando nem a lubrificação hidrodinâmica nem a lubrificação elasto-hidrodinâmica (EHL) são eficazes. Os componentes de máquinas interagem de maneira peculiar nesse regime, o que levanta a questão de como esses componentes são lubrificados e qual o mecanismo de lubrificação envolvido (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Hamrock (1991) discute a lubrificação de contorno como uma condição na qual os picos e vales da superfície metálica não são separados pelo lubrificante, tornando os efeitos do filme fluido ineficazes e resultando em considerável contato de asperezas, conforme mostrado na Figura 16. Os filmes superficiais variam em espessura de 1 a 10 nm, dependendo do tamanho molecular.

Figura 16 - Condições do filme dos regimes de lubrificação

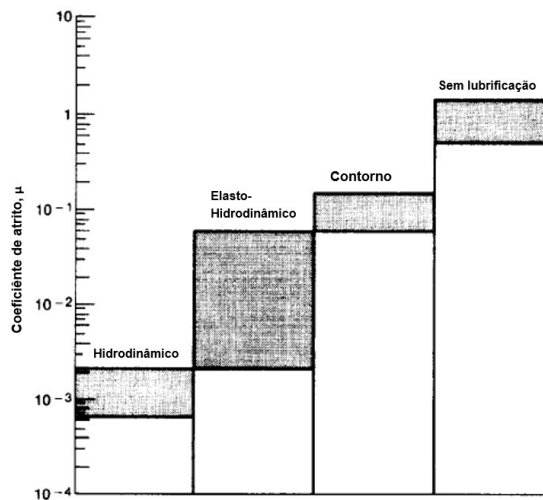


- (a) Lubrificação por filme completo - superfícies separadas pelo filme de lubrificante completo.
 (b) Lubrificação parcial - tanto o lubrificante em massa quanto o filme limite desempenham um papel.
 (c) Lubrificação por filme limite - o desempenho depende essencialmente do filme limite.

Fonte: Adaptado de Hamrock (1991)

A Figura 17 mostra o comportamento do coeficiente de atrito nos diferentes regimes de lubrificação. Na lubrificação de contorno, embora o atrito seja muito maior do que no regime hidrodinâmico, ele ainda é consideravelmente menor do que para superfícies sem lubrificação.

Figura 17 - Diagrama do coeficiente de atrito para diferentes condições de lubrificação



Fonte: Adaptado de Hamrock (1991)

Stachowiak e Batchelor (2013) ampliam a discussão, classificando os mecanismos de lubrificação de contorno e extrema pressão em termos de capacidade de carga relativa e temperatura de atrito limite. Esses mecanismos são frequentemente controlados por aditivos presentes no óleo lubrificante. A formação de camadas protetoras de baixo atrito nas superfícies desgastadas é comum nesse regime, proporcionando benefícios comerciais significativos, dado que o custo dos aditivos lubrificantes é geralmente insignificante em comparação ao valor do equipamento mecânico.

De acordo com Stachowiak e Batchelor (2013), os mecanismos de lubrificação envolvidos podem ser classificados em termos de capacidade de carga relativa, viscosidade e temperatura de atrito limite, conforme mostrado no Quadro 6.

Quadro 6 - Categorias de lubrificação limite e extrema pressão

Temperatura	Carga	Mecanismo de Lubrificação
Baixo	Baixo	Aumento de viscosidade próximo à superfície de contato, não específico ao lubrificante.
	Alto	Minimização do atrito pela cobertura das superfícies de contato com camadas monomoleculares adsorvidas de surfactantes.
Alto	Médio	Formação irreversível de <i>soap layer</i> e outros materiais viscosos na superfície desgastada por reação química entre aditivos lubrificantes e superfície metálica.
		Aumento de viscosidade localizada na superfície, específico para aditivos lubrificantes e base do lubrificante.
	Alto	Formação de camadas amorfas de detritos finamente divididos a partir da reação entre aditivos e a superfície metálica do substrato. Reação entre aditivos lubrificantes e superfície metálica. Formação de filmes sacrificiais de material inorgânico na superfície desgastada, impedindo o contato metálico e o desgaste severo.

Fonte: Stachowiak e Batchelor (2013)

Em geral, a lubrificação de limite e extrema pressão envolve a formação de camadas protetoras de baixo atrito nas superfícies desgastadas. Uma exceção ocorre quando o aumento da viscosidade localizada na superfície é extremamente limitado.

O princípio operacional do regime de lubrificação de limite pode ser melhor ilustrado considerando o coeficiente de atrito. Em termos simples, o coeficiente de atrito ' μ ' é definido como a razão entre a força de atrito 'F' e a carga aplicada normal à superfície 'W', de acordo com a Equação (1):

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (1)$$

O modelo simplificado para a força de atrito em lubrificação limite pode ser expresso pela Equação (2):

$$F = \frac{A_t}{\tau} \quad (2)$$

Onde, F é a força de atrito [N]; A_t é a área de contato real [m²]; τ é o esforço de cisalhamento efetivo do material [Pa].

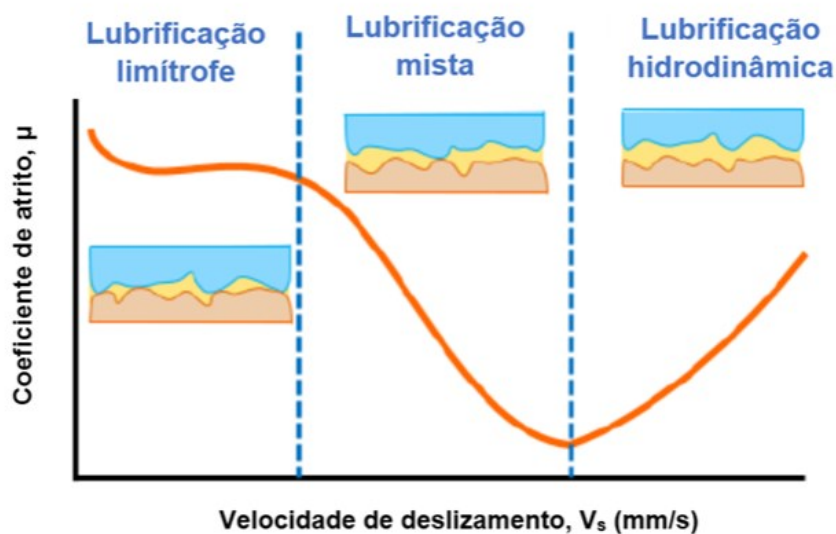
Conforme as Equações (1) e (2), é possível concluir que, para obter um baixo coeficiente de atrito, é necessário um material de baixa resistência ao cisalhamento e alta dureza, requisitos que são claramente incompatíveis. No entanto, se for possível

formar uma camada de baixa resistência ao cisalhamento em um substrato duro, então baixos coeficientes de atrito podem ser alcançados (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

2.4.2.4 Lubrificação mista

De acordo com Noria (2017), a lubrificação limite pode ser reduzida conforme se aumenta a velocidade, resultando em um filme lubrificante muito mais eficaz entre superfícies em movimento. À medida que a velocidade continua a aumentar, o potencial de contato entre as superfícies é reduzido, e a espessura do filme lubrificante aumenta. Isso leva a uma condição chamada de "lubrificação mista", que é uma zona intermediária entre a lubrificação limite, menos eficaz, e as condições mais ideais de lubrificação hidrodinâmica e elasto-hidrodinâmica. É como se fosse uma área nebulosa entre essas duas formas de lubrificação. Esses regimes são mais ideais para a redução do atrito e o bom funcionamento das superfícies em contato. Portanto, as condições de lubrificação mudam com a velocidade, passando de uma situação menos eficiente para regimes mais ideais à medida que a velocidade aumenta, conforme pode ser observado através da curva de Stribeck na Figura 18.

Figura 18 - Curva de Stribeck e regimes de lubrificação



Fonte: Adaptado de Rudnick (2009)

A curva de Stribeck trata-se de uma ferramenta capaz de representar graficamente todos os estágios de lubrificação em sistemas do tipo mancal de

deslizamento. Analisando em ordem crescente do fator de Stribeck (nU/W), é possível identificar, respectivamente, os momentos de lubrificação limite, lubrificação mista, lubrificação elasto-hidrodinâmica e lubrificação hidrodinâmica (PAVELESCU; TUDOR, 1987).

2.5 Retificação

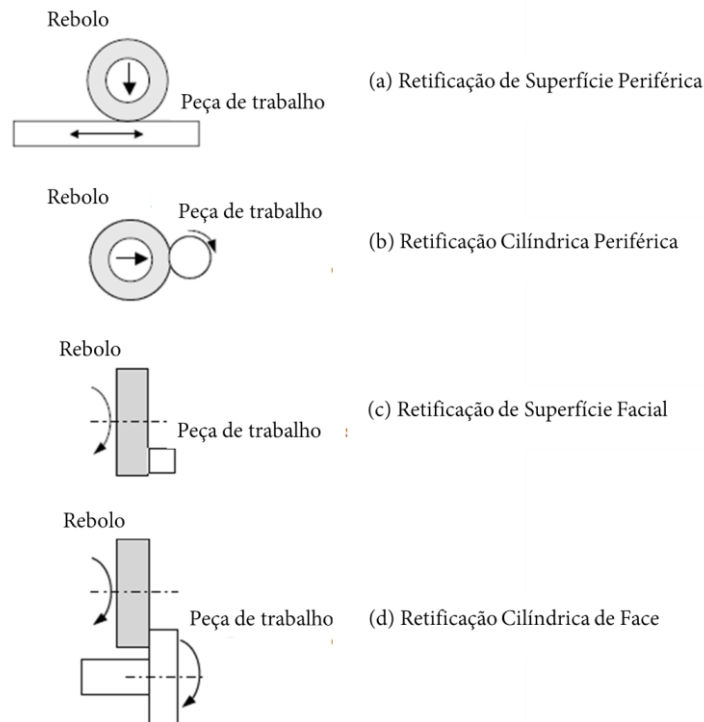
A retificação, juntamente com outros métodos de usinagem abrasiva como lixamento, polimento, lapidação, brunimento e processos de superacabamento, constitui um conjunto de técnicas que empregam rebolos em alta velocidade para remover material da peça. Esses rebolos estão disponíveis em uma ampla variedade de formas, tamanhos e tipos de materiais abrasivos, proporcionando geometrias e acabamentos diversos durante o processo de retificação e demais atividades abrasivas. Em diversos momentos, a retificação se distingue a esses processos de usinagem devido a algumas distinções, muitas vezes baseadas em diferenças cinemáticas, como em casos de velocidades abrasivas muito baixas, como na lapidação, ou altas velocidades operadas na retificação (ROWE, 2014).

A retificação é uma técnica que proporciona alta precisão e a manutenção de tolerâncias rigorosas em relação ao tamanho, forma e rugosidade da superfície das peças usinadas (ROWE, 2014). Como exemplo, em um injetor de combustível, onde a folga entre a guia e o bico da agulha apresenta uma folga de poucos microns (ROBERT BOSCH GMBH, 2006).

2.5.1 Processos básicos de retificação

O processo de retificação pode ser dividido em duas principais categorias de máquinas: retificação de superfície plana e retificação cilíndrica. Essas duas categorias de máquinas executam os quatro processos básicos ilustrados na Figura 19.

Figura 19 - Exemplos de quatro operações básicas de retificação usando rebolos retos

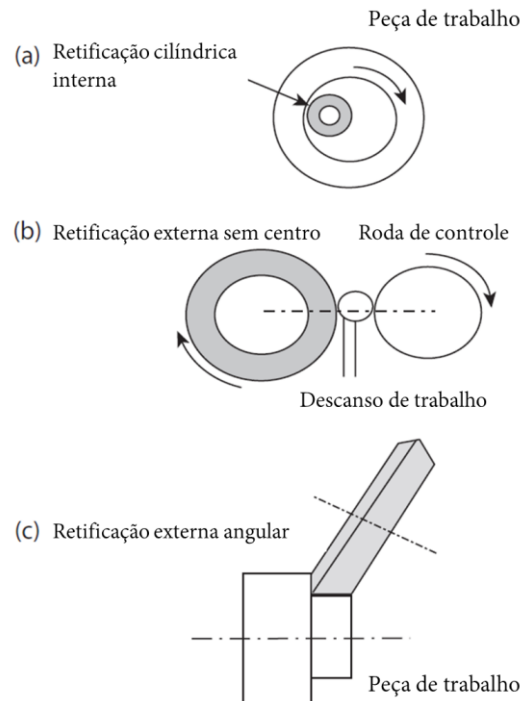


Fonte: Adaptado de Rowe (2014, p. 6)

Sendo que o processo de retificação cilíndrica periférica é o utilizado na empresa parceira e será o foco deste estudo.

2.5.1.1 Processos de retificação cilíndrica

Os processos básicos de retificação cilíndrica incluem variantes externas, internas e sem centro, como ilustradas na Figura 20. A retificação interna de furos é um processo cilíndrico em que um pequeno rebole é montado em um fuso esguio conhecido como mola, e a peça de trabalho é mantida em um mandril ou pinça. A retificação externa sem centro é um processo cilíndrico em que a peça de trabalho é apoiada em sua superfície externa contra um descanso de trabalho e uma roda de controle. No processo interno sem centro, as peças de trabalho podem ser seguradas e giradas em uma placa frontal. A retificação por aproximação angular pode ser empregada para retificação cilíndrica interna ou externa, permitindo que uma face seja usinada ao mesmo tempo que um diâmetro. A retífica angular permite que a remoção do material seja espalhada pela face e periferia da roda, prolongando assim a vida útil da roda antes da reparação. (ROWE, 2014).

Figura 20 - Exemplos de processos de retificação

Fonte: Adaptado de Rowe (2014, p.7)

2.5.1.2 Processo de retificação interna

Segundo Marinescu et al. (2004), a retificação interna é o processo primordial para obter acabamento de alta precisão em superfícies internas ou furos. Esses furos podem ser simples cilindros ou apresentar perfis complexos e precisos, essenciais em aplicações como a fabricação de rolamentos, pistas de juntas homocinéticas e guias de injeção de combustível.

A maioria das operações de retificação interna de precisão requer a habilidade de manter tolerâncias extremamente ajustadas, abrangendo medidas de tamanho, circularidade, retidão, conicidade e cilíndricidade na faixa de 0,5 a 10 μm . No entanto, em aplicações especializadas, como no caso da injeção de combustível, as tolerâncias têm se tornado ainda mais rigorosas nos últimos anos, chegando a atingir 0,25 μm ou menos. (MARINESCU et al., 2004).

3 REVISÃO DA LITERATURA

Esse capítulo tem por objetivo apresentar estudos publicados sobre desgaste de fuso de esferas. As pesquisas se centraram inicialmente no fuso de esferas, buscando por métodos de medição de desgaste e estudos de caso de falhas nesse componente.

A busca também foi estendida para rolamentos e mancais de deslizamento, por conta da similaridade do movimento e do ambiente de trabalho desses componentes. Os artigos são apresentados em ordem cronológica nas duas seções.

3.1 Métodos de identificação de desgastes em fuso de esferas

Os artigos sobre desgaste em fusos de esferas apresentados neste trabalho apresentam metodologias de medição de desgaste através de parâmetros diretos (avaliação de trincas, pites e defeitos no fuso) e indiretos (monitoramento de frequência de vibração, temperatura de operação, pré-carga).

3.1.1 Métodos diretos

Schlagenhauf et al. (2023) propuseram estudar o progresso de desgaste durante a operação de fusos de esferas a partir de análises visuais. A vida de um fuso de esferas pode ser dividida em três fases, segundo Haberkern (1998, apud SCHLAGENHAUF et al., 2023, p. 1): falha repentina prematura devido à deformação plástica, perda gradual de pré-carga devido à abrasão e falha após um longo período de uso, causada pela carga periódica.

Nos experimentos de Schlagenhauf et al. (2023) foi observado o desgaste por fadiga de contato a partir de registros fotográficos de fusos em operação expostos às mesmas condições de trabalho. A Figura 21 apresenta o crescimento de pites em duas amostras de fusos de esferas:

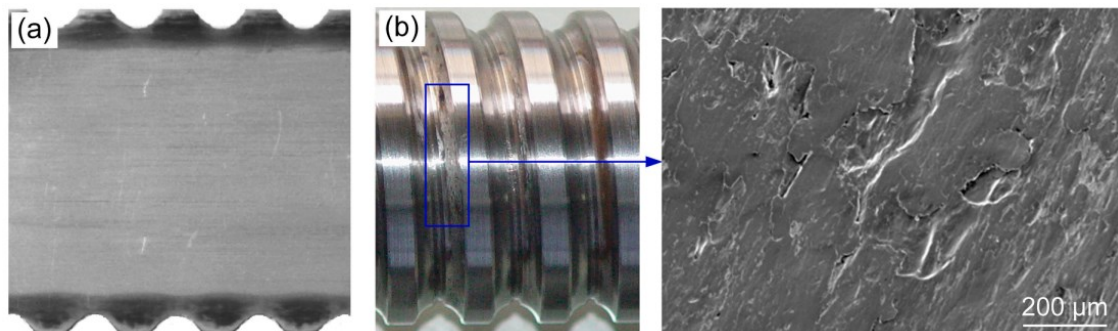
Figura 21 - Progresso do desgaste por pite em duas amostras



Fonte: Schlagenhauf *et al.* (2023)

Li *et al.*, (2023) por sua vez, avaliaram o efeito dos parâmetros do endurecimento por indução progressiva e acabamento por usinagem em falhas de fusos de esferas. O método utilizado para análise de falhas consistiu em realizar metalografias, medições de dureza e ensaios de tração, identificando desgaste por fadiga de contato (Figura 22), resultado do esforço repetitivo exercido pelos elementos rolantes.

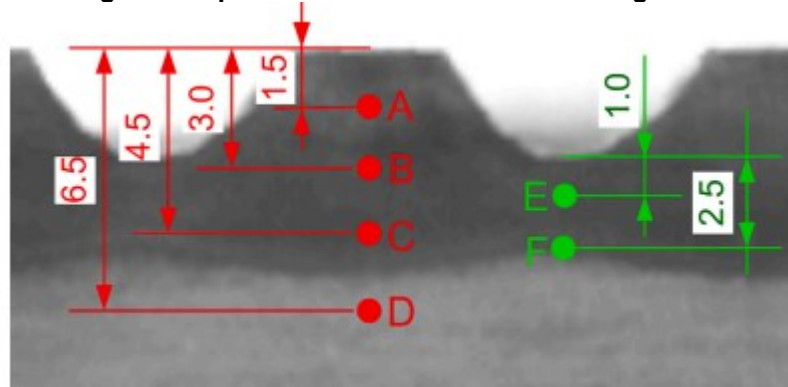
Figura 22 - (a) região endurecida e (b) fadiga de contato por elementos rolantes



Fonte: Li *et al.* (2023)

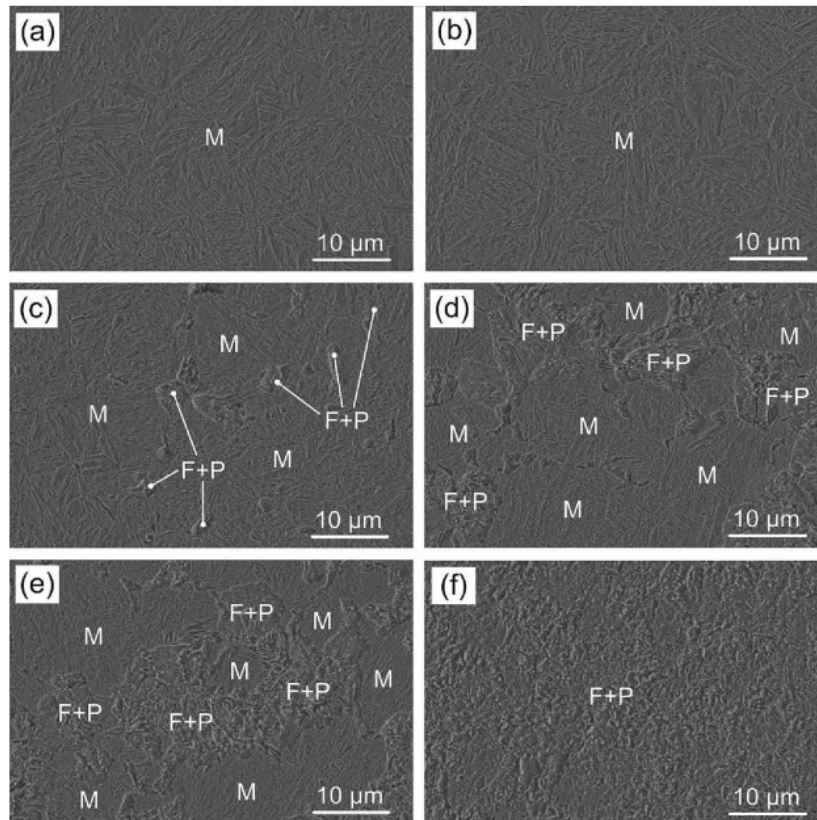
As regiões avaliadas por microestrutura são mostradas nas Figura 23, Figura 24 e Figura 25.

Figura 23 - profundidades de análise metalográfica



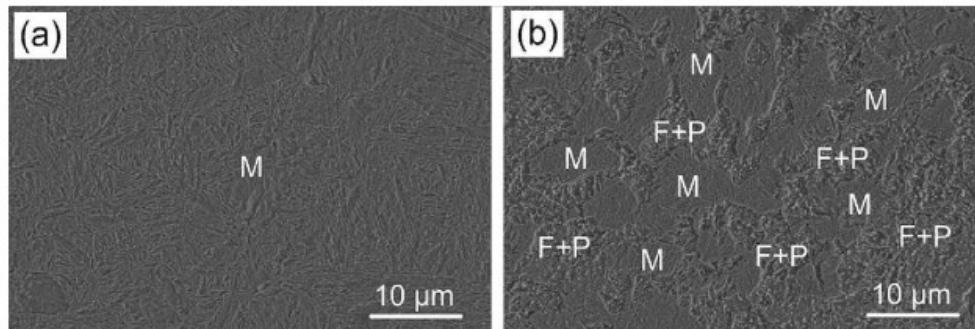
Fonte: Li et al. (2023)

Figura 24 - Microestruturas em relação ao canal superior: (a) 1.5 mm da superfície, (b) 3 mm da superfície (c) 4 mm da superfície (d) 4.5 mm da superfície (e) 5 mm da superfície (f) 6.5 mm da superfície



Fonte: Li et al. (2023)

Figura 25 - Microestrutura em relação ao canal inferior: (a) 1 mm da superfície, (b) 2.5 mm da superfície



Fonte: Li et al. (2023)

Nas Figura 24 e Figura 25 é possível observar as diferenças de microestrutura do fuso de esferas de acordo com a profundidade, o que é esperado para componentes que passaram por endurecimento por indução progressiva, em que se espera que superfície tenha uma dureza maior que o núcleo e resista mais a abrasão. Para o trabalho em questão, em que a análise da superfície é o foco, isso mostra que a abrasão é um fator de preocupação para o funcionamento desses fusos, e esse tratamento busca mitigar esse mecanismo de desgaste.

3.1.2 Métodos indiretos

Xing Liu *et al.* (2016) buscou medir o desgaste do fuso de esferas baseado nos sinais de corrente do motor. O método de análise concentra-se no sinal de corrente durante o avanço rápido em um eixo durante o processo de usinagem. Se o fuso do eixo não atende aos requisitos, é realizado um monitoramento para determinar a necessidade de substituição. Seis sensores são empregados para monitorar a corrente de fase única no eixo de avanço e no fuso, integrando os dados por meio de um sistema de aquisição.

Pichler *et al.* (2018) e Pandhare *et al.* (2022) se concentraram em monitorar a vida útil a partir de dados de fusos de esferas com estados de falha conhecidos. Ambos utilizaram acelerômetros, medidores de velocidade de rotação e torque.

Pichler *et al.* (2018) utilizou uma abordagem de detecção de abrasão, fricção e potência como indicadores de danos, utilizando também sensores de temperatura do sistema durante a operação. No entanto, Pandhare *et al.* (2022) faz correlações com um parâmetro funcional do fuso aplicado a máquinas CNC, o *backlash*, que

corresponde à diferença entre a posição esperada e a real durante o movimento do fuso, o que exigiu o uso de um giroscópio.

Já Tiandong Xi *et al.* (2020) determinaram a relação entre a primeira frequência de ressonância e o desgaste da castanha de esferas, a partir de testes envolvendo a medição do deslocamento do fuso em relação à castanha e a carga axial aplicada por meio de um cilindro hidráulico. Para simular o desgaste de um fuso de esferas sem a utilização de uma castanha dupla, foi projetada uma bucha espaçadora que é conectada à castanha de castanha única não pré-carregadas, que reduz efetivamente a rigidez axial dos eixos de alimentação.

3.2 Métodos de identificação de desgastes em rolamentos/ mancais de deslizamento

Os artigos de desgastes em rolamentos e mancais de deslizamento foram selecionados devido à similaridade de funcionamento e ambiente em que esses componentes são utilizados. Os métodos apresentados incluem a análise de parâmetros geométricos, peso do mancal ou quantidade particulados (métodos indiretos) e estudo de caso de falha em rolamentos de rolo (método direto).

Chandra Sharma e Hargreaves (2014) fizeram um estudo comparativo de métodos de avaliação de desgaste em mancais de deslizamento. O estudo considerou três grupos de métodos de medição de desgaste. O primeiro se baseou na perda de peso do mancal, o segundo na análise da mudança nos particulados no fluido lubrificante, e o terceiro se concentrou na análise das mudanças na geometria do mancal. Dentre os parâmetros avaliados no último grupo de métodos apresentados, como máxima profundidade de desgaste, folga radial, rugosidade da superfície e diferenças na circularidade, este último mostrou-se o mais promissor para mancais de deslizamento, devido à sua sensibilidade em detectar desgastes mesmo em níveis baixos. Para isso, foi utilizada uma técnica que registrava o formato do mancal antes e depois do teste com alta ampliação, identificando as diferenças na circularidade por meio da sobreposição das imagens registradas.

Já Gong *et al.* (2017) se concentraram na análise de falha em rolamentos de rolos para engrenagens planetárias de turbina eólica. Para isso, análises visuais, testes de material usando um espectrômetro fotoelétrico, metalografia e medição de dureza em microdurômetro foram realizados no anel interno e nos rolos. Além disso,

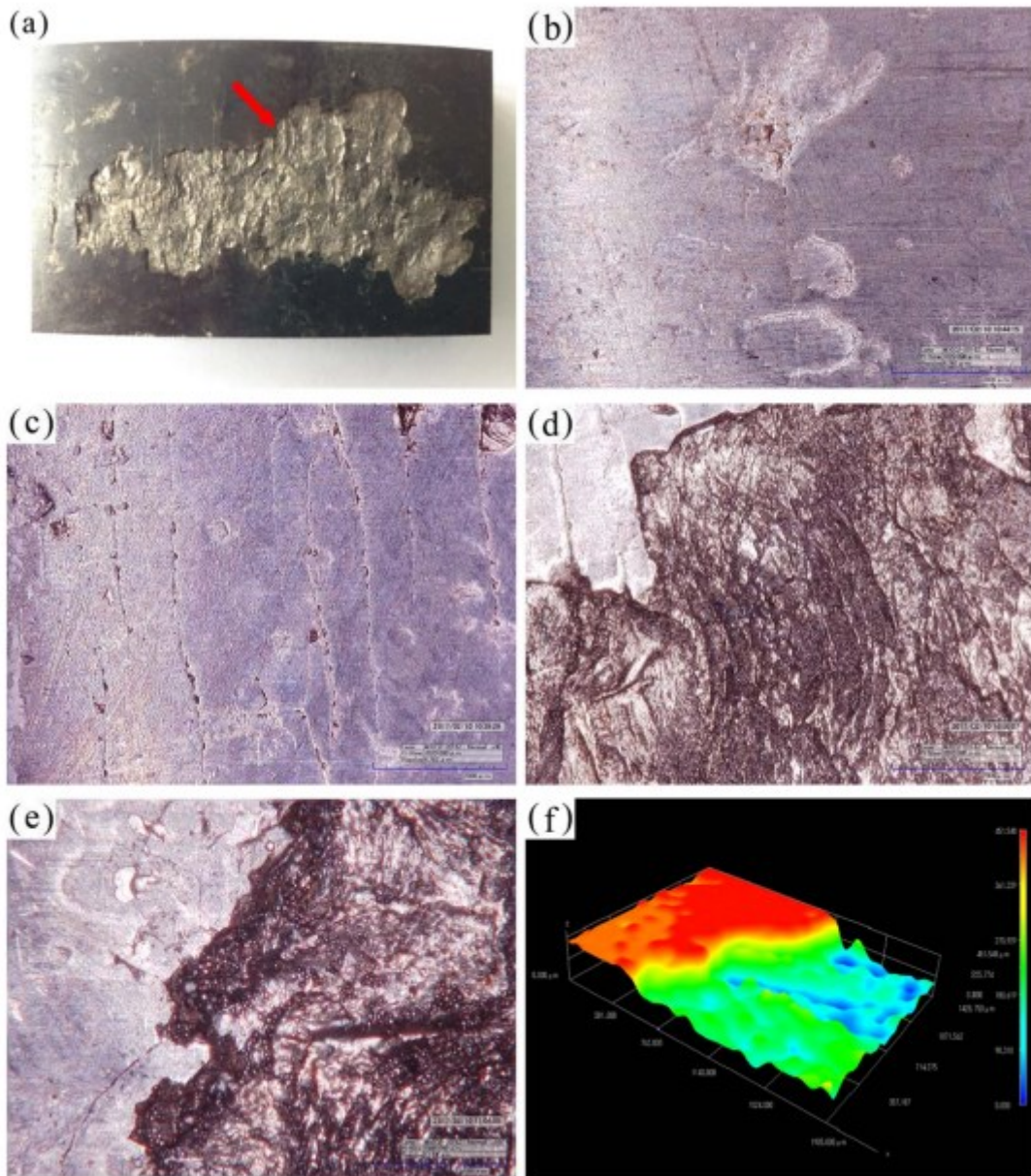
estereomicroscopia 3D (3D SM) e observações com microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram feitas no anel interno. A composição do lubrificante presente entre o anel e os rolos também foi avaliada. A Figura 26, Figura 27 e Figura 28 mostram o estado dos rolamentos.

Figura 26 - Aparências externas do rolamento de rolos com falha fornecido no local.
(a) três áreas de desgaste na pista do anel interno (b) amostra da área 1 (c) amostra das áreas 2 a 5 (d) oito rolos cilíndricos



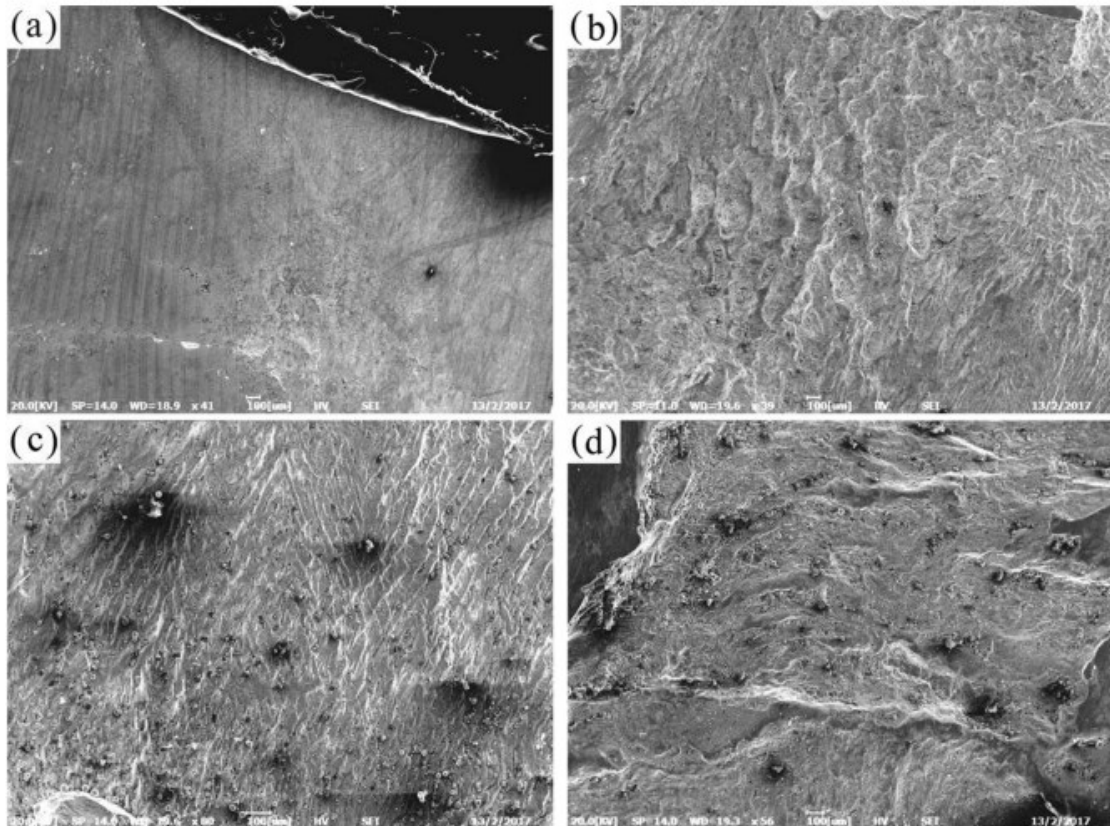
Fonte: Gong *et al.* (2017)

Figura 27 - Macroscopia da pista do anel interno do rolamento de rolos em 3D SM.
(a) morfologia total da área amostral 3 (b) reentrâncias em diferentes formatos (c) múltiplas fissuras. (d) traços de desgaste em forma de ondulações (e) ranhuras de arado (f) perfil 3D da superfície de desgaste



Fonte: Gong *et al.* (2017)

Figura 28 - Micrografias em MEV da superfície da pista do anel interno do rolamento.
(a) Endentação em forma de orelhas de coelho (b) os traços de desgaste em forma de ondulações. (c) Os traços de desgaste em forma de agulha e as marcas de impacto após a ampliação (d) as áreas descascadas



Fonte: Adaptado de Gong et al. (2017)

A partir da análise das imagens e de outros indícios, os autores do artigo identificaram que o modo de falha é o desgaste abrasivo a três corpos, em que o mecanismo de falha pode ser dividido em três estágios: o primeiro estágio foi caracterizado pela formação de indentações e macro trincas pelo terceiro corpo tanto no anel quanto nos rolos, com um desgaste mais proeminente no anel devido à sua menor dureza. No segundo estágio, houve deformação plástica localizada após a formação das endentações, juntamente com particulados resultantes da fricção entre o terceiro corpo e os materiais base. O terceiro estágio foi marcado por um desgaste massivo da superfície e fratura, que aumentou conforme a área afetada pelo desgaste se expandiu.

4 METODOLOGIA

Esse tópico apresenta a metodologia para a avaliação do desgaste em fusos de esferas. Inicialmente, os materiais utilizados nos corpos de prova são definidos. Em seguida, descreve-se as etapas de procedimentos adotados.

Cada amostra consiste em um conjunto composto por castanha, eixo e esferas. O conjunto completo e montado pode ser visualizado na Figura 29. Esses fusos são essenciais para o funcionamento das retíficas.

4.1 Materiais

Para a realização deste projeto de pesquisa, duas (2) amostras de fusos de esferas em estado desgastado que foram sucateadas devido a folga são utilizadas:

1. Fuso: 4674915013-029

- Defeito: Folga superior a 1 centésimo.
- Observação: Foi efetuada uma tentativa de aumentar a vida útil do fuso de esferas, substituindo por esferas maiores. A folga foi conferida e o fuso remontado no carro e testado na máquina. No entanto, para eliminar a folga do fuso, foi necessário aplicar um carregamento maior do que o normal. Isso levou o carro a travar e gerar um alarme de esforço.

2. Fuso: 4674915013-022

- Defeito: Folga no fuso.
- Observação: Não é um item passível de prolongamento da vida útil, não há informações adicionais das tentativas de manutenção como no fuso de final 029.

Figura 29 - Conjunto de fuso de esferas 022 e 029



Fonte: Aatoria própria (2024)

Para analisar o desgaste no conjunto do fuso de esferas, é fundamental conhecer seus componentes.

4.1.1 Castanha

As castanhas são categorizadas em séries, que incluem a miniatura, speed e standard. A castanha utilizada nos conjuntos pertence à série standard, com o modelo específico ZEV-E-S. Ela possui fixação do tipo aparafusar e possui as dimensões 20x5Rx3 ($d_0 \times P \times D_w$), em que o diâmetro nominal (d_0) é de 20 mm, o passo (P) é de 5 mm com sentido de rosca configurado à direita (xR), e o diâmetro da esfera (D_w) é de 3 mm.

As castanhas utilizadas neste projeto estão classificadas na classe de tolerância T3 ($12\mu\text{m}/300\text{mm}$), conforme detalhado no Quadro 1 da Seção 2.1.1.2. Quanto à classe de pré-carga, foi adotada a Classe 3 – C1, indicando uma pré-carga leve em castanhas simples, como indicado no Quadro 4 da Seção 2.1.1.2.

4.1.2 Fuso

Com relação às especificações do eixo do fuso de esferas, o comprimento da rosca é de 174 mm, com comprimento total de 259 mm e diâmetro de 16 mm. A extremidade é usinada conforme a necessidade da empresa. O eixo possui uma classe de tolerância T3, conforme o Quadro 1 da Seção 2.1.1.2

Segundo o fabricante, os fusos de esferas são feitos de aço termicamente tratado de alta qualidade, liga de aço cromo carbono ou aços temperados. As pistas do fuso e da castanha possuem uma dureza mínima de HRC 58.

4.1.3 Esfera

As esferas utilizadas no sistema possuem 3 mm de raio. Nenhuma outra informação é fornecida. Nesse trabalho não foi feito estudo de material das esferas.

4.1.4 Lubrificante

A lubrificação é feita por duas graxas diferentes. A graxa utilizada pelo fabricante é a graxa Dynalub 510, que possui as seguintes características, conforme informações da Bosch Rexroth (2021):

É uma graxa de alta eficiência em lítio saponificado da classe NLGI 2 conforme DIN 51818 (ou KP2K-20 conforme DIN 51825).

- Apresenta boa resistência à água.
- Oferece proteção anticorrosiva.
- Possui uma faixa de temperatura de -20 até $+80$ °C.

A natureza química dessa graxa é óleo mineral, sabão de lítio, sabão de potássio e a sua composição pode ser observada na Quadro 7:

Quadro 7 - Composição química da graxa Dynalub 510

Nome Químico	Nº CAS	Concentração [%]
Dialquilditiofosfato de zinco	68849-42-3	1.5
Aminofosfato	80939-62-4	<1
Amina modificada	68411-48-1	<1
Tolutriazol modificado	60584-90-3	<0.1

Fonte: Bosch Rexroth (2003)

Além disso, a empresa parceira utiliza a graxa STABURAGS NBU 12/300 KP para relubrificação dos fusos. A natureza química dessa graxa é óleo mineral e sabão complexo de bário e a sua composição pode ser observada no Quadro 8:

Quadro 8 - Composição química da graxa STARBURAGS NBU 12/300 KP

Nome Químico	Nº CAS Nº EC	Concentração [%]
Benzenamina, N-fenil-, produtos da reação com 2,4,4-trimetilpenteno	68411-46-1 270-128-1	>= 1 - < 2.5

Fonte: Kluber Lubrication (2015)

Um resumo das especificações dos fusos utilizados neste trabalho está disponível Quadro 9.

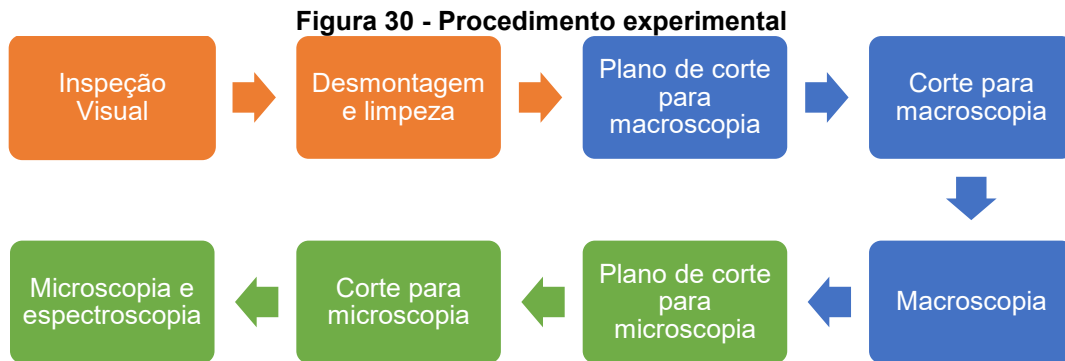
Quadro 9 - Especificações da amostra de fuso utilizada

Característica	Valor
Material do flange de adaptação	SAE 4340 / VM40
Comprimento Total	259,0 mm
Comprimento de Rosca	174,0 mm
Diâmetro	16,0 mm
Passo	5 mm à direita
Classe de Precisão	T3 (12 µm/300 mm)*
Classe de Pré-Carga	3 – C1 Pré-carga leve
Vedação	<i>Standard</i> (deslizamento suave)
Lubrificação	Graxa permanente <i>MobilGrease 28</i> ou graxa NLGI classe 2 (<i>Lithium-base</i> DIN 51818).
*Medida de desvio máximo admissível – Para cada 300mm de curso o desvio máximo do passo tolerado é de 12µm, essa medida é fornecida pelo fabricante	

Fonte: Empresa Parceira Deste Projeto (2023)

4.2 Procedimento

O procedimento experimental é composto pelas seguintes etapas apresentadas na Figura 30:



Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.1 Inspeção visual, desmontagem e limpeza

A primeira etapa consiste na inspeção visual dos dois conjuntos montados, registrando fotos da situação pré-desmontagem para identificar como foi feita a desmontagem. Em seguida, procedemos à desmontagem e à limpeza dos componentes utilizando folhas de papel descartável. Durante e após a limpeza, foram observadas marcas de desgaste e feitos registros fotográficos. Esses registros serviram de base para definir os planos de corte para a análise macroscópica.

4.2.2 Definição dos planos de corte e corte para macroscopia

Após a inspeção visual, foram estabelecidos os planos de corte, que são as seções dos componentes do fuso de esferas onde é relevante realizar a avaliação no estereoscópio.

Em seguida, procedeu-se aos cortes no fuso utilizando uma cortadeira de laboratório. Inicialmente, foram realizados cortes transversais e longitudinais com o auxílio de uma cortadeira automática e uma manual, marca Buehler modelo Delta Automatic Abrasive cutter e marca Arotec modelo Arocor 60, respectivamente.

No caso das castanhas, o procedimento foi semelhante, selecionando a seção roscada para análise no estereoscópio.

4.2.3 Macroscopia

Após a limpeza e observação dos componentes, foi feita análise dos planos de corte no estereoscópio Olympus SZX10, observadas com ampliação até 63 vezes e registradas imagens das principais evidências de desgaste.

4.2.4 Definição do plano de cortes e cortes para microscopia

Na sequência, foram realizados novos cortes nas regiões onde foram observadas marcas de desgaste nas macrografias. A Figura 31 mostra as seções das castanhas e dos fusos, em vermelho estão destacadas as seções que foram levadas para a microscopia.



Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.5 Análise em microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS)

Na sequência, foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura da marca Zeiss, modelo EVO MA 15 (MEV), no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM), para avaliar visualmente as regiões de interesse com ampliação de até 3000 vezes. Além disso, foram realizadas análises de espectroscopia em algumas regiões para uma melhor identificação do tipo de desgaste.

4.3 Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos da análise visual dos fusos de esferas. A partir desses resultados, da rastreabilidade desses fusos e de informações da literatura, será dada sequência na discussão sobre o mecanismo de desgaste e as possíveis causas para os danos observados.

4.3.1 Discussão sobre a rastreabilidade dos fusos

Os fusos analisados possuem documentação registrada e neste tópico serão apresentadas as informações mais relevantes. Inicialmente, os fusos possuem um código de rastreamento, utilizado durante o trabalho para diferenciar as amostras (referenciadas pelas numerações finais 022 e 029). Além disso, foi possível identificar o momento em que o fuso foi instalado em uma retífica e quando foi descartado, permitindo determinar a vida útil em dias, conforme apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 - Vida útil dos fusos analisados

Código Fuso	Início do uso	Fim do uso	Vida útil (dias)
4674915013-022	10/03/2022	24/11/2023	624
4674915013-029	31/03/2023	07/11/2023	221

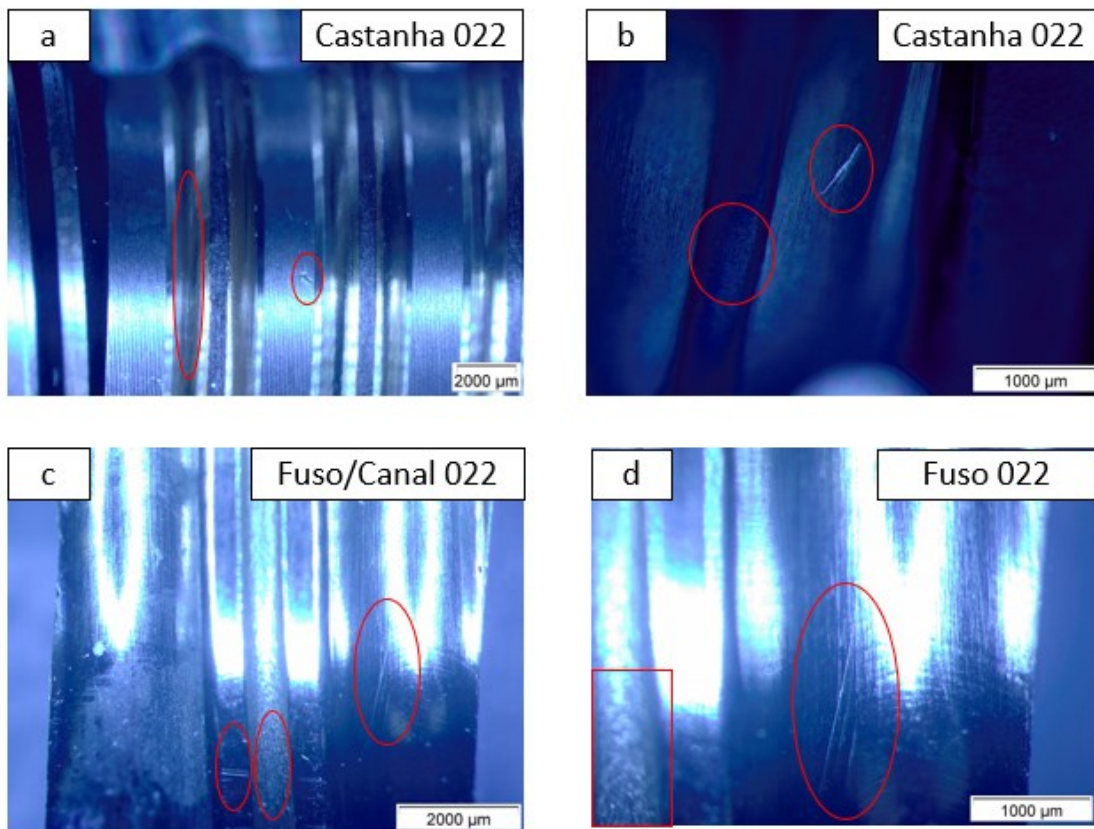
Fonte: Autoria própria (2024)

Observa-se que o fuso 022 teve uma durabilidade de cerca de 624 dias, enquanto o 029 durou apenas 221 dias. Em ambos os casos, a vida útil foi significativamente menor do que os 10 anos proposto pelo fabricante. De acordo com a empresa parceira, a causa do descarte em ambos os fusos foi a folga excessiva entre as esferas e o fuso, o que impediu o correto funcionamento da retífica. Como o desgaste é o principal fator para perda de função em componentes mecânicos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013), e a única forma de separar o contato entre os componentes é por meio de uma graxa, supõe-se que seja o principal fator para a formação de folga.

4.3.2 Análise visual

Neste tópico, são apresentadas as principais evidências de desgaste identificadas na macroscopia e na microscopia. As fotos foram organizadas por fuso e por método utilizado. A Figura 32 e Figura 33 apresentam o conjunto 022 e a Figura 34 e Figura 35 o conjunto 029.

Figura 32 - Macroscopia do conjunto 022

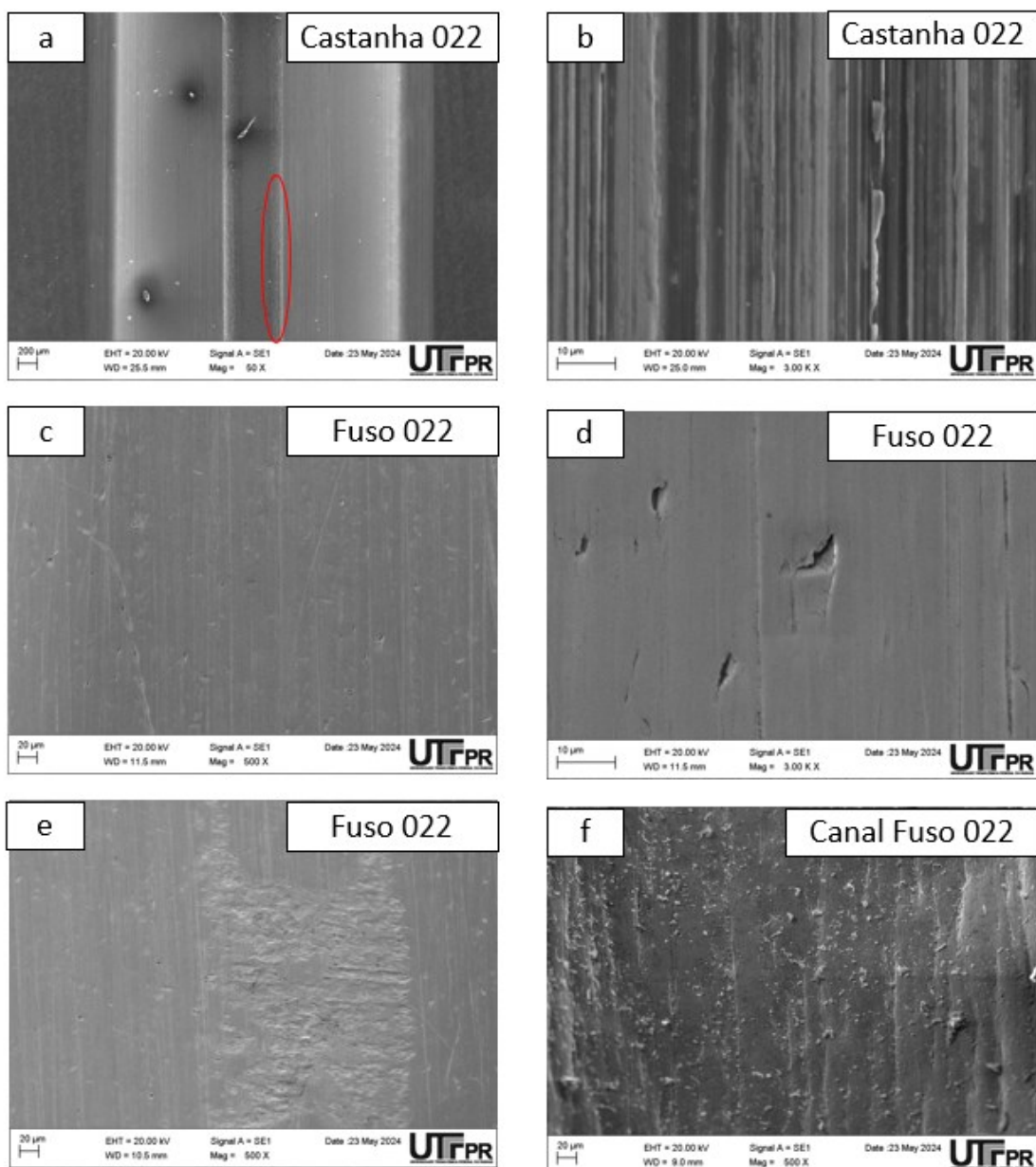


Fonte: Autoria própria (2024)

Na Figura 32(a), é possível observar riscamento na pista de contato com as esferas na região destacada em vermelho na esquerda, o que é um indício de abrasão. Também foi identificado uma irregularidade de aproximadamente 0,75 mm de comprimento na área entre pistas (destacado em vermelho do lado direito), que, devido à falta de contato entre os componentes do sistema tribológico nessa área, supõe-se que essa marca de desgaste foi originada durante a montagem/desmontagem do fuso na máquina. Na Figura 32(b), também é possível observar indícios de abrasão moderada no canal interno da castanha (destaque em vermelho no lado esquerdo), onde há acúmulo de graxa. Isso leva à hipótese de que

partículas contaminantes na graxa estão causando desgaste. Além disso, foi identificada abrasão severa, identificada em vermelho no lado esquerdo. Na Figura 32(c), vemos riscamento na pista de contato com as esferas e na divisão entre o canal interno do fuso e a pista (destacados do lado direito e esquerdo, respectivamente). Também observamos marcas muito similares às da Figura 32(b) no canal do fuso, em destaque ao centro. Na Figura 32(d), que é uma ampliação da Figura 32(c), pode-se observar em detalhe as marcas de desgaste comentadas anteriormente.

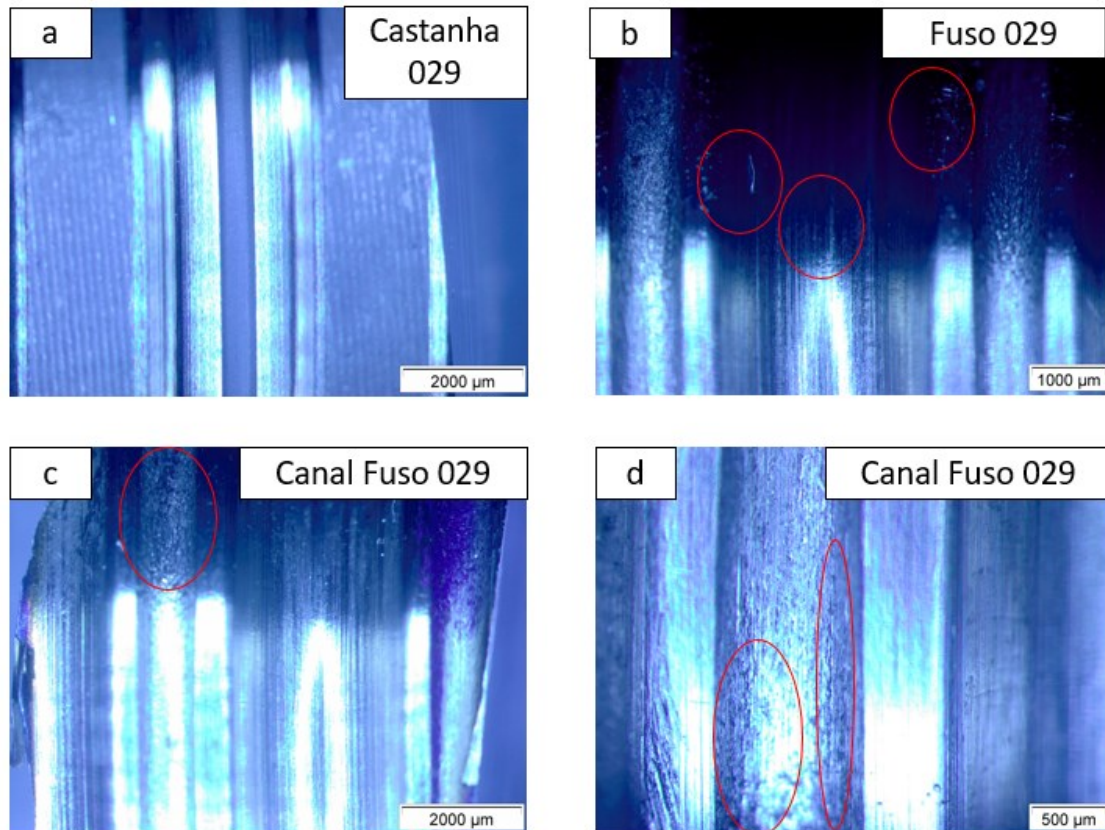
Figura 33 - Microscopia do conjunto 022



Fonte: Autoria própria (2024)

No trecho (a) da Figura 33 identificou-se sinais de abrasão na castanha, com destaque para o riscamento identificado em vermelho, mostrado com ampliação na Figura 33(b). Já na Figura 33(c) é nítido o riscamento em múltiplas direções, potencialmente causados por particulados desprendidos do próprio fuso ou um contaminante abrasivo. Na Figura 33(d), é possível observar arrancamento de material a nível microscópico, também por condições abrasivas. Na Figura 33(e), pode-se observar adesão por deformação, e na Figura 33(f), identificam-se particulados no canal e deformação da superfície, que no estereoscópio foram identificados como abrasão moderada. Esses particulados podem ser resíduos do lubrificante, com potencial formação de tribofilme.

Figura 34 - Macroscopia do conjunto 029

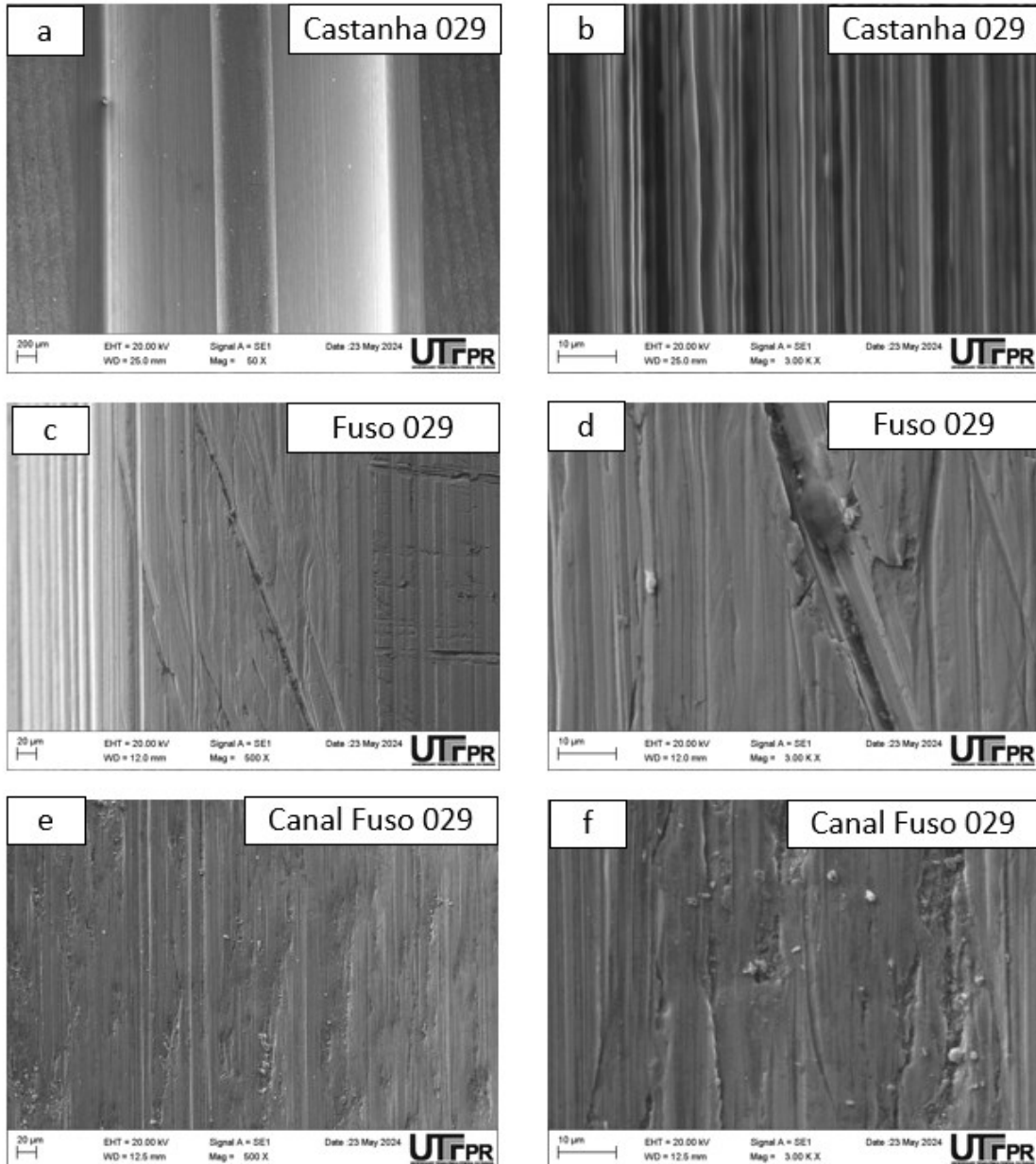


Fonte: Autoria própria (2024)

Com relação ao conjunto 029, a Figura 34(a) mostra uma seção da castanha onde não foram identificados danos. Na pista do fuso, apresentada na Figura 34(b), predomina a abrasão em todas as regiões marcadas em vermelho. Na Figura 34(c) e (d), ambos referentes ao canal interno, observa-se a presença de abrasão moderada (micro arrancamentos), semelhante ao conjunto 022, porém em maior extensão na

peça. Especialmente na Figura 34(d), a partir da maior ampliação, é possível observar uma falha com comprimento de aproximadamente 1 mm, que aparenta ser deformação na superfície.

Figura 35 - Microscopia do conjunto 029



Fonte: Autoria própria (2024)

Na Figura 35(a), são identificados apenas indícios de abrasão moderada, e a ampliação na Figura 35(b) mostra irregularidades na superfície que são indícios de abrasão moderada, especialmente considerando o estado da superfície para uma ampliação de 3000 vezes. Quando se observa o fuso na Figura 35 em (c) e (d), no entanto, percebe-se riscamento e deformação, com destaque especial para a seção

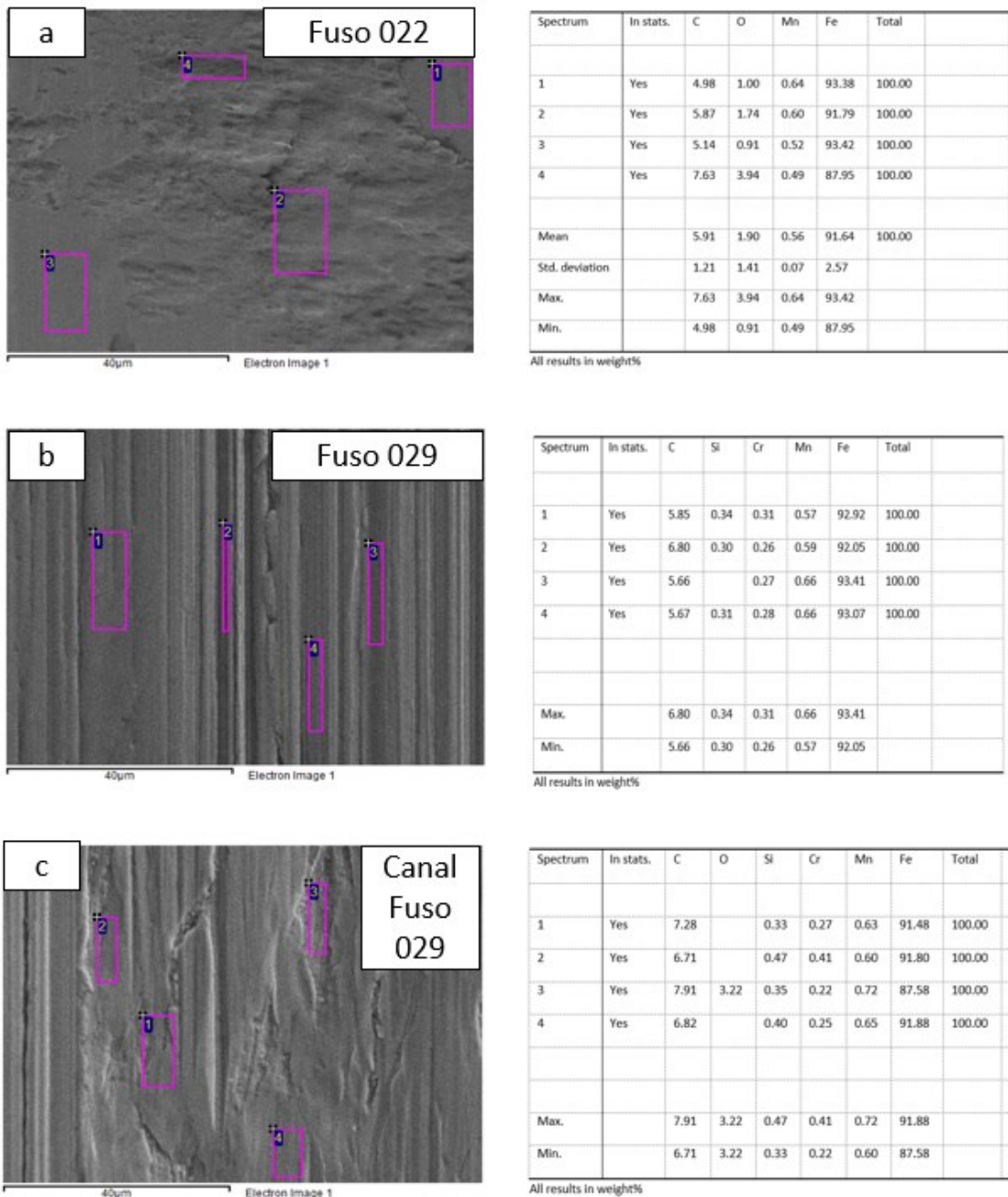
(d), em que há acúmulos de material em uma fissura formada pela deformação da superfície. Nas seções (e) e (f), que correspondem ao canal interno do fuso, também é possível identificar grandes indícios de deformação e acúmulo de material, assim como riscamentos.

Em resumo, ambos os conjuntos apresentam acentuados índices de deformação/adesão (o aspecto da superfície é similar a adesão de outro material, mas a origem é próprio material que foi deformado) e desgaste por abrasão. O fuso 029 apresentou maior dano que o fuso com código final 022. Por outro lado, a região analisada da castanha com código final 022 foi mais afetada que a com código final 029.

4.3.3 Análise de espectrometria de raio X

Nessa seção, serão discutidos os resultados de espectrometria de raio X de das seções analisadas com a microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando uma ampliação de 3.000 vezes. A Figura 36 mostra as seções analisadas e as respectivas áreas nas quais foi mensurada a proporção de elementos químicos na superfície e na subsuperfície:

Figura 36 - Espectrometria de raio X dos fusos



Fonte: Autoria própria (2024)

A seção (a) da Figura 36 é uma ampliação da Figura 33(e), e as áreas onde foi feita a espectrometria apresentam a composição típica de um aço. Esse resultado, aliado ao aspecto da imagem, sugere que a adesão observada no fuso foi causada pela deformação do próprio material, e não por um contaminante. Conclusão semelhante pode ser feita para as seções (b) e (c), que correspondem a imagens do fuso e do canal interno do fuso 029, respectivamente.

4.3.4 Mecanismo de desgaste e causas

Com a análise das imagens e das espectrometrias de raio X, conclui-se que em ambos os conjuntos o mecanismo de desgaste predominante é a abrasão, seguida pela adesão.

Esse cenário de desgaste prematuro pode ter sido causado pela lubrificação inadequada em determinadas regiões do fuso e da castanha, permitindo contato direto entre as esferas. Isso explica a presença de tantos riscos nas pistas pelas quais as esferas percorrem. Também foram identificadas marcas de desgaste nos canais internos, onde não há contato das esferas com o conjunto. Uma hipótese é que particulados provenientes do próprio material causaram abrasão e deformação severa da superfície.

Em relação à vida útil, percebe-se que o fuso 022 permaneceu instalado em uma retífica por quase 3 vezes mais tempo que o fuso 029. Confirmando que os danos por abrasão e adesão se mostraram mais severos no fuso 029 que no 022, comparando as imagens tanto das macroscopias quanto das microscopias.

Um ponto de atenção identificado nas notas de manutenção do fuso 029 é que, com o aumento da folga no fuso, houve uma tentativa de reparo com a colocação de esferas maiores que as originais e aumento da pré-carga no fuso. Isso pode ter agravado o desgaste identificado no fuso, resultando em marcas de desgaste de maior dimensão e em maior quantidade que no fuso 022, contribuindo principalmente para a deformação da superfície.

Conforme apresentado na seção 1.2, de acordo com o fabricante, o deslocamento do fuso em cursos reduzidos (menor que o comprimento da castanha, cerca de 5 a 6 mm) impede a recirculação completa das esferas, dificultando a lubrificação. Essa condição de trabalho pode ser relacionada com a abrasão identificada nas amostras analisadas. Para esse problema, recomenda-se estudar o impacto do aumento da frequência de ciclos de lubrificação na vida útil.

Outra hipótese é de que os fusos foram sujeitos a cargas de trabalho excessivas, pois ocorreu deformação da superfície. Isso pode ter surgido na tentativa de remover a folga dos fusos, especialmente no fuso 029, em que esse procedimento foi documentado, mas é possível que a deformação tenha sido iniciada durante a operação, e dessa forma recomenda-se dar atenção as cargas tanto na montagem quanto na manutenção.

4.3.5 Síntese dos danos e mecanismos de desgaste

Com o intuito de resumir as informações discutidas ao longo do capítulo, foi elaborado o Quadro 11, em que é feita a comparação entre os mesmos componentes (fuso com fuso e castanha com castanha) para os dois conjuntos analisados:

Quadro 11 - Resumo dos danos e mecanismos de desgaste

Critério	Fuso		Castanha	
	Final 022	Final 029	Final 022	Final 029
Vida útil	Maior	Menor	Maior	Menor
Abrasão severa	Menor	Maior	Pouca	-
Abrasão moderada	Menor	Maior	Maior	Menor
Deformação/Adesão	Menor	Maior	-	-

Fonte: Autoria própria (2024)

Em relação aos danos, foi considerada na comparação a gravidade do maior dano observado em cada conjunto e como segundo critério a quantidade de danos nas superfícies.

5 CONCLUSÕES

Esse projeto de pesquisa concentrou-se na observação de danos e modos de desgaste em fusos de esferas utilizados em retíficas internas. Foram analisados dois fusos provenientes de retíficas que apresentavam diferentes marcas de desgaste e vida útil, através de análises macroscópicas com um estereoscópio e microscópicas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS).

Conforme apresentado no Quadro 11, foi identificado no fuso de código final 029 danos de maior gravidade por abrasão e adesão que no fuso de final 022. Essa condição severa contribui para o aumento das folgas de forma prematura e conseqüentemente uma vida útil menor. Já a castanha 022 apresentou maior abrasão moderada que a castanha 029 e pouquíssima abrasão severa. A razão pela qual ocorreu a divergência com os resultados do fuso não pode ser imediatamente apontada, mas suspeita-se que essa abrasão tenha surgido durante a montagem ou desmontagem do fuso.

A hipótese principal para os eventos apontados é que o deslocamento em cursos reduzidos, utilizado na aplicação, está dificultando a lubrificação e isso está afetando a vida útil de ambos os fusos. Variações na vida útil e na quantidade de danos podem ser atribuídas potencialmente a cargas de trabalho excessivas (BOSCH REXROTH, 2021) e potencialmente diferentes em cada caso.

O objetivo geral de compreender e identificar de maneira abrangente as causas de desgaste em fusos de esferas das retíficas foi atingido a partir das análises realizadas. Para aprofundamento do estudo, sugere-se que seja realizado uma análise química das graxas no estado final de uso, comparando-as com graxas novas, a fim de confirmar que não há presença de contaminantes externos. Sugere-se também avaliar a vida útil para a carga de trabalho atual na aplicação de cursos reduzidos a fim de verificar se a vida útil pode realmente ser prolongada. Além disso, recomenda-se identificar o material das esferas e verificar se há condição de adesão entre a esfera e os fusos.

REFERÊNCIAS

- ASTM International. G40-17: **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**. 2021.
- BLAU, Peter J. **Tribosystem analysis: a practical approach to the diagnosis of wear problems**. CRC Press, 2017.
- BOSCH REXROTH. **Ball screw assemblies BASA/Planetary screw assemblies PLSA. Screw assemblies**. R999001185. ed. 2021. Pdf. Disponível em: <https://www.boschrexroth.com/pt/br/media-details/8516e0f6-8d8e-47ec-9777-b3af5bac1d2a>. Acesso em: 15 set. 2023.
- CAMERON, A., **The principles of lubrication**, Longmans Green & Co Ltd, London, England, 1966.
- CHANDRA SHARMA, Subhash; HARGREAVES, Doug. **A suitable method for journal bearing wear measurement**. *Industrial lubrication and tribology*, v. 66, n. 1, p. 15-22, 2014.
- CROLLA, David A. **Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body**. Oxford: Elsevier, 2009.
- GONG, Yi et al. **Failure analysis on abnormal wear of roller bearings in gearbox for wind turbine**. *Engineering Failure Analysis*, v. 82, p. 26-38, 2017.
- HAMROCK, B. J.; SCHMID, S. R.; JACOBSON, B. O. **Fundamentals of fluid film lubrication**. CRC Press. New York, 2004.
- HAMROCK, B. J. **Fluid Film Lubrication with Applications to Machine Elements**. Columbus, Ohio: Mechanical Engineering, Ohio State University, 1991.
- HECKER, Rogelio L.; LIANG, Steven Y. **Predictive modeling of surface roughness in grinding**. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, n. 8, p. 755-761, 2003.
- KALATEC. **Manutenção em fuso de esferas**. Disponível em: <https://www.kalatec.com.br/manutencao-em-fuso-de-esferas>. Acesso em: 30 set. 2023.
- LI, H. P. et al. **Failure analysis of ball screw in the progressive induction hardening and finishing machining**. *Engineering Failure Analysis*, p. 107410, 2023.
- LIU, Xing et al. **A new approach to identify the ball screw wear based on feed motor current**. In: *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Robotics and the International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering*. 2016. p. 1-5.

MARINESCU, I.D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W.B., INASAKI, I., 2006. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. CRC Press (Taylor and Francis), Boca Raton, FL.

NORIA CORPORATION. **Lubrication Regimes Explained**. Disponível em: <https://www.machinerylubrication.com/Read/30741/lubrication-regimes>. Acesso em: 02 jun. 2024.

PAVELESCU, D., TUDOR, A. **The sliding friction coefficient - its evolution and usefulness**, 1987. 330 p.

PANDHARE, Vibhor et al. **Ball Screw Health Monitoring with Inertial Sensors**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022.

PINTAÚDE, Giuseppe. **DESGASTE POR FADIGA DE CONTATO DE ROLAMENTO E POR FRETTING**. Curitiba: Ufpr, 2021. 52 slides, color.

PINTAÚDE, Giuseppe. **ANÁLISE SISTÊMICA DO DESGASTE: VISÃO DE PROPRIEDADE EXTRÍNSECA**. Curitiba: UTFPR, 2021. 28 slides, color.

PICHLER, Kurt; KLINGLMAYR, Johannes; PICHLER-SCHEDER, Markus. **Detecting wear in a ball screw using a data-driven approach**. In: 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). IEEE, 2018. p. 3123-3128.

ROBERT BOSCH GMBH. **Diesel Fuel Injection Systems Unit Injector System and Unit Pump System**, 2006.

ROWE, William Brian. **Principles of Modern Grinding Technology**. 2. ed. Waltham: Elsevier, 2014. 437 p.

RUDNICK, Leslie R.; **Lubricants additives - Chemistry and application**, 2nd edition, CRC Press, 2009.

SCHLAGENHAUF, Tobias et al. **Analysis of the visually detectable wear progress on ball screws**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 40, p. 1-9, 2023.

SHAW, Milton C., **Principles of abrasive processing**, Clarendon Press - Oxford Science Publications, 1996.

SHIN, Geon-Ho; HUR, Jang-Wook. A new finite element analysis model to estimate contact stress in ball screw. **Applied Sciences**, v. 12, n. 9, p. 4713, 2022.

STACHOWIAK, Gwidon; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering tribology**. Butterworth-heinemann, 2013.

TORBACKE, M.; RUDOLPHI, A. K.; ELISABET, K. **Lubricants: introduction to properties and performance**. John Wiley & Sons, 2014. WALLACE, P. R. The Band Theory of Graphite. *Physical Review*, v. 71, n. 9, p. 622-634, 1 maio 1947.

XI, Tiandong et al. **Condition monitoring of ball-screw drives based on frequency shift**. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, v. 25, n. 3, p. 1211-1219, 2020.

ZUM GAHR, Karl-Heinz. Chapter 4 Classification of Wear Processes. In: Tribology Series, Elsevier, Volume 10, 1987, Pages 80-131. ISSN 0167-8922. ISBN 9780444427540. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8922\(08\)70722-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(08)70722-3).