

**UNIVERSIDADE ESTÁCIO DE SÁ  
CAMPUS PRAÇA XI  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE FALHA PREMATURA DO ROLAMENTO FRONTEIRO DA  
ENGRENAGEM INTERMEDIÁRIA DA CAIXA DE REDUÇÃO DE UM MOTOR TURBO  
EIXO**

**JÚLIO CÉSAR GOMES DA SILVA**

**RIO DE JANEIRO**

**2017**

**JÚLIO CÉSAR GOMES DA SILVA**

**ANÁLISE DE FALHA PREMATURA DO ROLAMENTO FRONTEIRO DA  
ENGRENAGEM INTERMEDIÁRIA DA CAIXA DE REDUÇÃO DE UM MOTOR TURBO  
EIXO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Campus Praça XI da Universidade Estácio de Sá, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Prof. M.Sc. Paschoal Villardo Silva - Orientador

Prof. D.Sc. Mila Rosendahl Avelino – Coorientadora

**RIO DE JANEIRO**

**2017**

**ANÁLISE DE FALHA PREMATURA DO ROLAMENTO FRONTEIRO DA  
ENGRENAGEM INTERMEDIÁRIA DA CAIXA DE REDUÇÃO DE UM MOTOR TURBO  
EIXO**

Por

**JÚLIO CÉSAR GOMES DA SILVA**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado  
para obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico, pela Banca examinadora formada  
por:

---

Presidente: Prof. Paschoal Villardo Silva, M.Sc. - Orientador, UNESA

---

Membro: Prof. Mila Rosendahl Avelino, D.Sc. - Coorientadora, UNESA

Rio de Janeiro, 14/11/2017

À minha esposa Adriana Teixeira Ferreira e aos nossos filhos, Pedro Ferreira de Lima e Silva e Davi Ferreira de Lima e Silva, tão amados e queridos.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter nos dado saúde e força para superar as dificuldades.

À Universidade Estácio de Sá, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela pela qual vislumbramos um horizonte superior, o que procuramos honrar através da confiança no mérito e na ética, aqui presentes.

Aos orientadores Paschoal Villardo Silva e Mila Rosendahl Avelino, pelo suporte no pouco tempo que lhes coube, pelas suas correções e incentivos.

Aos familiares, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigado.

Não encontro defeitos. Encontro soluções.

Henry Ford

## RESUMO

Neste trabalho foi analisada a falha prematura do rolamento fronteiro da engrenagem intermediária da caixa de redução de um motor turbo eixo fabricado pela empresa TBM do Brasil. O objetivo do estudo foi verificar os mecanismos físicos de falha envolvidos no processo, como fatores de comportamento humano podem causar falhas em componentes mecânicos e como evitar que tal fato ocorra. Foi realizado estudo de caso através de levantamento de documentos de projeto, relatórios de análise de falha do controle da qualidade da empresa e revisão bibliográfica referente aos mecanismos de falha que poderiam estar envolvidos no caso em questão. Após análise, foi constatado que o rolamento falhou prematuramente devido a fadiga superficial, também chamada de fadiga de contato, provocada por inclusão de partículas de material estranho (Alumínio) entre a pista externa do rolamento e o invólucro que o envolvia. Indentações na pista de rolagem externa, existindo uma mais acentuada, provocaram a nucleação da trinca subsuperficial, característica do fenômeno de fadiga de contato, que aflorou à superfície apresentando crateração e logo depois o lascamento, também característicos do fenômeno. Como a inclusão de partículas estranhas, causadora direta da falha, ocorreu no momento da montagem do rolamento, o trabalho propõe que sejam observados os fatores de comportamento humano, verificando continuamente as condições do ambiente de trabalho, proporcionando os melhores resultados possíveis para a relação entre as pessoas e as suas atividades.

Palavras-chave: rolamento, fadiga de contato, fatores humanos.

## ABSTRACT

In this work the premature failure of the front bearing of the intermediate gear of the reduction box of the turbo-shaft engine manufactured by TBM do Brazil was studied. The objective of the study was to verify the physical fault mechanisms involved in the process, as human behavior factors can cause failures in mechanical components and how to prevent such occurrence. A case study was carried out through the collection of project documents, reports of failure analysis of company quality control documentation, a survey of the failure mechanisms be involving the case under study was carried out. After analysis, it was found that the bearing failed prematurely due to the contact fatigue caused by the inclusion of particles of foreign material (Aluminum) between the outer race of the bearing and the envelope that enveloped it. Indentations in the external rolling track, with a more pronounced one, provoked the nucleation of the subsurface crack, characteristic of the contact fatigue phenomenon, which appeared on the surface presenting crater and soon after the chipping, also characteristic of the phenomenon. As the inclusion of foreign particles, causing direct failure, at the moment of the assembly of the bearing, it is proposed to give importance to the factors of human behavior by continuously, checking the conditions of the work environment, providing the best possible results for the relationship between people and its activities.

Key words: rolling, contact fatigue, human factors.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA.....	12
1.2	OBJETIVOS.....	12
1.2.1	Geral .....	12
1.2.2	Específicos.....	12
1.3	JUSTIFICATIVA PARA ESTUDO DO TEMA.....	13
1.4	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.5	METODOLOGIA .....	13
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA DE PROJETO .....</b>	<b>14</b>
2.1	MANCAL DE ROLAMENTO .....	14
2.2	SELEÇÃO DE MANCAIS DE ROLAMENTO .....	15
2.3	LUBRIFICAÇÃO DOS ROLAMENTOS.....	20
2.4	FALHAS DE COMPONENTES MECÂNICOS .....	20
2.4.1	Falhas de projeto .....	20
2.4.2	Falhas na seleção de materiais.....	21
2.4.3	Imperfeições do material .....	21
2.4.4	Deficiências de fabricação .....	22
2.4.5	Erros de montagem ou instalação .....	22
2.4.6	Condições de operação ou manutenção inadequada .....	22
2.5	ANÁLISE DE FALHAS.....	23

2.5.1	Levantamento De Dados .....	24
2.5.2	Testes e Inspeções .....	24
2.5.3	Prevenção das Falhas.....	25
2.5.4	Avaliação e Monitoração.....	25
2.6	FADIGA .....	26
2.7	FADIGA SUPERFICIAL.....	30
2.8	ANÁLISE DE FALHAS EM ROLAMENTOS.....	46
2.9	FRACTOGRAFIA.....	49
2.10	FATORES HUMANOS.....	51
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>58</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>64</b>
5.1	RESUMO DAS CAUSAS DA FALHA.....	68
5.2	RESUMO DAS RECOMENDAÇÕES .....	69
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Falhas em máquinas, que ocorrem geralmente com aplicação de cargas cíclicas em níveis de deformação dentro da zona elástica dos materiais e que produzem fraturas com características frágeis em materiais dúcteis caracterizam falhas por fadiga.

Segundo relatório elaborado por Reed et al., do Governo dos Estados Unidos em 1982 (NORTON, 2013), os Estados Unidos já gastavam na época, 100 bilhões de dólares por ano com a prevenção ou com a ocorrência de falhas por fadiga em todo tipo de máquina: veículos terrestres, ferroviários, aviões de todos os tipos, pontes, guindastes, equipamentos industriais em geral, equipamentos da indústria petrolífera, entre outros.

Podemos dividir o estudo da fadiga em duas partes: a fadiga dita estrutural e a fadiga de contato. A fadiga estrutural se aplica, por exemplo, a eixos rotativos sujeitos a cargas cíclicas onde tensões alternadas entre tração e compressão se distribuem por todo volume do componente. A fadiga de contato está relacionada a esforços cíclicos de compressão localizados em pequenas áreas de contato entre as superfícies envolvidas em movimento relativo de rolamento puro, que é o caso de rolamentos, onde as dimensões da área de contato são pequenas quando comparadas às dimensões dos corpos em contato e com o raio relativo de curvatura das superfícies.

Este trabalho apresentará estudo de caso de falha por fadiga de contato que será desenvolvido a partir da análise da falha de um rolamento de uma engrenagem intermediária de uma caixa de redução de um motor turbo eixo.

Na análise das causas, além de fatores físicos presentes em mecanismos de falha de componentes mecânicos, também serão considerados fatores humanos, que estão relacionados, por exemplo, à inclusão de partículas entre superfícies no momento da montagem de componentes como mancais de rolamentos. Será visto também como evitar que fatores de comportamento humano venham a interferir na confiabilidade de componentes de máquinas.

## **1.1 Problema de Pesquisa**

As questões de pesquisa que orientam este trabalho são as seguintes:

Quais os possíveis mecanismos causadores de falhas mecânicas estão envolvidos na fratura do rolamento em questão?

Como fatores de comportamento humano influenciam na falha de componentes mecânicos? Como evitar que isso ocorra?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Geral**

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é analisar e identificar as causas dos danos encontrados no rolamento fronteiro da engrenagem intermediária da caixa de redução de um motor turbo eixo utilizado para reduzir a rotação de um motor de 41.586RPM para 600RPM e também relacioná-las com fatores de comportamento humano que podem ser responsáveis por introduzir nos componentes possíveis causas de falhas futuras.

### **1.2.2 Específicos**

Analisar e, se necessário, revisar o procedimento existente de montagem e inspeção de caixa de redução do motor incluindo boas práticas relacionadas à montagem dos rolamentos das engrenagens. Incluir no programa de treinamento da empresa, curso de formação de montagem e inspeção dos rolamentos da caixa de redução do motor a fim de reduzir ou eliminar falhas prematuras dos componentes.

### **1.3 Justificativa Para Estudo Do Tema**

O presente trabalho justifica-se, já que irá reduzir ou eliminar a remoção prematura da caixa de redução de motores turbo eixo. O tratamento dessa não conformidade, além de aumentar a confiabilidade do produto, permitirá reduzir o tempo de serviço na etapa de manutenção de módulos de motores aeronáuticos, os riscos de acidentes decorrentes desta falha, os custos do processo e, conseqüentemente, o aumento da satisfação do cliente.

### **1.4 Delimitação Do Tema**

Análise das causas de falha do rolamento fronteiro da engrenagem intermediária da caixa de redução que resultou na remoção prematura de motores turbo eixo da empresa TBM do Brasil.

### **1.5 Metodologia**

Com o propósito de analisar as possíveis causas da falha do rolamento em questão, o presente trabalho apresenta estudo de caso no qual foram consultados: documentos relativos a controle da qualidade, relatórios de inspeção, levantamento bibliográfico sobre assuntos que norteiam o estudo de falhas em componentes mecânicos, seleção e montagem de rolamentos, fadiga de contato, fatores humanos, entre outros. Para isso, foram pesquisados livros de engenharia, manuais técnicos, e artigos científicos.

## 2 METODOLOGIA DE PROJETO

### 2.1 Mancal de rolamento

Mancal é um componente mecânico que liga partes móveis a partes fixas de um equipamento. Partes de um equipamento que possuem movimento relativo entre si constituem um mancal, independente de formas e configuração. Os mancais podem deslizar, rolar ou funcionar de ambos os modos (NORTON, 2013). O objeto de estudo deste trabalho é um mancal de rolamento, também chamado apenas de rolamento.

Mancal de rolamento é o tipo de mancal, que transfere a carga principal por elementos rolantes em vez de deslizar. Segundo Norton (2013), podem ser classificados em dois tipos: mancais de esferas e mancais de rolos. São constituídos por quatro partes essenciais: anel externo, anel interno, esferas ou rolos (elementos rolantes) e separador (gaiola), podendo este ser omitido em alguns casos (BUDYNAS E NISBETT, 2011).

Segundo Norton (2013), quanto às cargas aplicadas, os mancais de esferas podem suportar cargas axiais e radiais combinadas dependendo do seu projeto e construção. Também são melhores para as aplicações pequenas e alta velocidade. Os mancais de rolos podem suportar cargas maiores e podem ser mais baratos para estas cargas maiores. Porém, de acordo com o tipo de sollicitação (radial ou axial), o tipo de rolo precisa ser adequado (abaulados ou afunilados).

Quanto aos materiais empregados em sua fabricação, mancais de esferas são produzidos em sua maioria em aço AISI 5210 endurecidos inteira ou parcialmente. Mancais de rolos são feitos em sua maioria de ligas de aços endurecíveis AISI 3310, 4620 e 8620. Melhorias nos processos de manufatura dos materiais tem permitido a fabricação de mancais com expectativa de vida mais longa inclusive quanto a falhas por fadiga de superfície (NORTON, 2013).

## 2.2 Seleção de mancais de rolamento

Segundo Norton (2013), depois de definido o tipo de rolamento em função da direção das cargas aplicadas é preciso definir o dimensionamento do mesmo, onde são consideradas a magnitude da carga dinâmica e estática além da vida desejada até a fadiga.

A vida em fadiga  $L_{10}$  dos mancais de rolamento é inversamente proporcional à magnitude da carga elevada ao cubo para mancais de esferas, e a uma potência de 10/3 para mancais de rolos. Essas relações podem ser expressas como:

mancais de esferas:

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^3 \quad (1)$$

mancais de rolos:

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^{10/3} \quad (2)$$

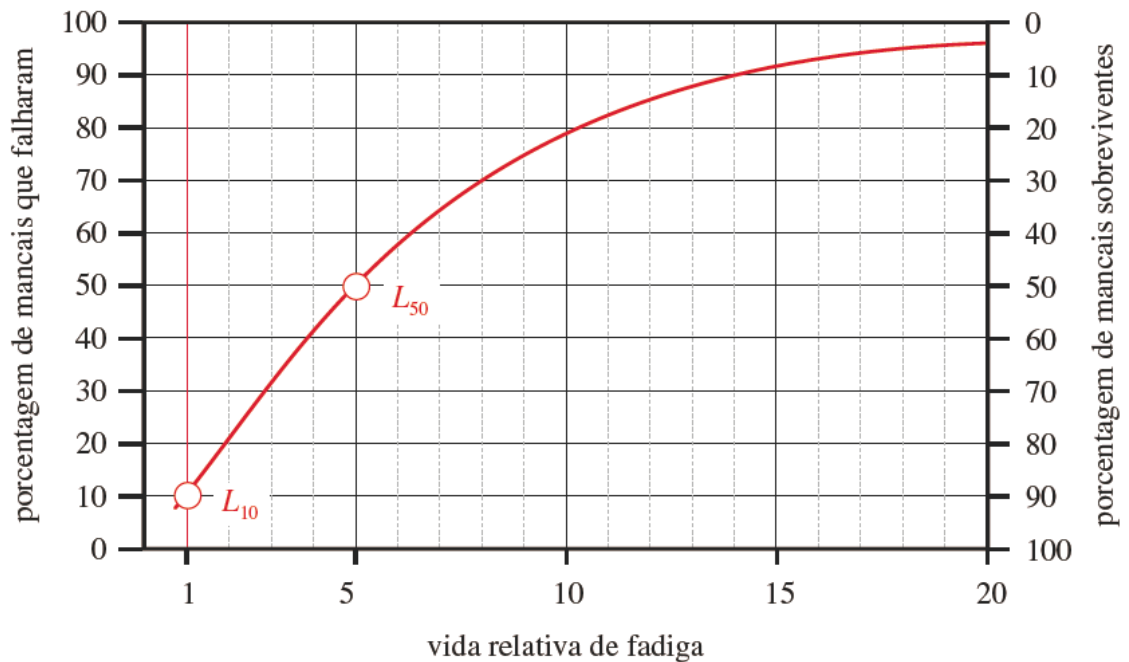
onde  $L_{10}$  é a vida em fadiga expressa em milhões de revoluções,  $P$  é a carga constante aplicada e  $C$  é a carga dinâmica básica de classificação para o mancal específico. A carga dinâmica básica de classificação  $C$  é a carga que dará uma vida de 1 milhão de revoluções à pista interna e funciona como valor de referencia que possibilita calcular valores de vida para os mancais porque as cargas aplicadas na prática nunca serão iguais a  $C$ , visto que a vida que se espera de um mancal é muito maior do que um milhão de revoluções (NORTON, 2013).

Os mancais são geralmente classificados com base na vida  $L_{10}$  (equações 1 e 2) expressa em milhões de revoluções, que se espera que 90% de uma amostra aleatória de mancais daquele tamanho alcancem ou excedam em suas cargas de projeto, ou

seja, a vida em que se espera que 10% do lote falhe antes da vida calculada. A vida dos rolamentos é o número de revoluções ou horas de operação nas condições de projeto. Se a aplicação for crítica, para uma percentagem menor de falha ser usada, basta multiplicar a vida  $L_{10}$  (equações 1 e 2) por um fator de confiabilidade  $K_R$  (equação 3) tomado da curva de distribuição de Weibull que este obedece (NORTON, 2013).

$$L_p = K_R L_{10} \quad (3)$$

Figura 1 - Distribuição típica da vida de mancais de elementos rolantes.



Fonte: NORTON, 2013, p. 658.



Tabela 1 - Fatores de confiabilidade R para uma distribuição de Weibull correspondente a uma probabilidade de falha P.

P%	R%	$K_R$
50	50	5,0
10	90	1,0
5	95	0,62
4	96	0,53
3	97	0,44
2	98	0,33
1	99	0,21

Fonte: NORTON, 2013, p. 659.

Tabela 2 - Tabela de um fabricante que indica entre outras características dos mancais, as cargas dinâmicas C

NÚMERO DO MANCAL*	DIMENSÕES DO CONTORNO						DIMENSÕES DO ANEL DE RETENÇÃO polegadas			RAIO MÁXIMO DO FILETE DO EIXO polegadas	PESO APROXIMADO lb	$\zeta_L$ VELOCIDADE LIMITE rpm	C CARGA NOMINAL DINÂMICA lb	$C_0$ CARGA NOMINAL ESTÁTICA lb
	FURO		DIÂMETRO EXTERNO		LARGURA		H	S	t					
	mm	polegadas	mm	polegadas	mm	polegadas								
6300	10	0,3937	35	1,3780	11	0,4331	0,125	1,562	0,044	0,025	0,13	22000	1400	850
6301	12	0,4724	37	1,4567	12	0,4724	0,125	1,625	0,044	0,040	0,15	20000	1700	1040
6302	15	0,5906	42	1,6535	13	0,5118	0,125	1,821	0,044	0,040	0,20	18000	1930	1200

Fonte: NORTON, 2013, p. 660.

Ainda segundo Norton (2013) a ASME e a ISO adotaram recentemente um padrão de vida modificada para os rolamentos que consiste em levar em consideração fatores como atrito, tensão circular de ajustes de pressão, condição de lubrificação e limpeza, carga centrífuga, critério de tensão de Von Mises e dados empíricos relacionados à fadiga de mancais de aço. Todos esses efeitos são combinados em um fator  $A_{sl}$  (equação 4) que multiplica então o tradicional valor  $L_{10}$  (equações 1 e 2).

$$L_{ASME} = A_{sl} L_{10} \quad (4)$$

Existe também a carga estática de classificação  $C_0$  que limita cargas estáticas para que não haja deformação plástica nos rolamentos. O limite de carga estática é a carga que irá produzir uma deformação de  $0,0001d$  (diâmetro do elemento rolante). Deformações maiores do que esta podem levar os rolamentos à falha prematura por fadiga conforme comentado na literatura.

Segundo Norton (2013), sobre a vida dos mancais, quando existe a ação combinada de cargas axiais e radiais, a AFBMA (Associação dos fabricantes de mancais antiatrito) recomenda a seguinte equação:

$$P = XVF_r + YF_a \quad (5)$$

Onde  $P$  é a carga combinada equivalente,  $F_r$  é a carga radial constante aplicada,  $F_a$  é a carga axial constante aplicada,  $V$  é um fator de rotação,  $X$  é um fator radial e  $Y$  é um fator axial.  $V$  é 1 para mancal com anel interno rodando e se o anel externo rodar é aumentado para 1,2 para alguns tipos de mancais.  $X$  e  $Y$  variam de acordo com o tipo de mancal e sua habilidade de acomodar as cargas aplicadas. Todos esses fatores são definidos pelos fabricantes. Um fator  $e$  também é especificado como razão mínima entre as forças axial e radial abaixo da qual a força axial pode ser ignorada para o caso particular onde:

$$\frac{F_a}{VF_r} \leq e \quad (6)$$

É possível inferir que  $X$  (equação 5) é igual a 1 e  $Y$  (equação 5) é igual a 0 a partir da equação 6.

Tabela 3 - Fatores **X**, **Y**, **V** e **e** (equação 5) para mancais.

Tipo de mancal			Em relação à carga o anel interno está:		Mancais de fila única 1)		Mancais de fila dupla 2)				e
			Rodando	Estacionário	$\frac{F_a}{VF_r} > e$		$\frac{F_a}{VF_r} \leq e$		$\frac{F_a}{VF_r} > e$		
			V	V	X	Y	X	Y	X	Y	
Mancais de esferas de ranhura de contato radial	(3)	(4)	(5)								
		$\frac{F_a}{C_0}$	$\frac{F_a}{iZD_w^2}$								
	0,014 0,028 0,056	25 50 100	↑ ↑ ↑	↑ ↑ ↑	↑ ↑ ↑	2,30 1,99 1,71	↑ ↑ ↑	↑ ↑ ↑	↑ ↑ ↑	2,30 1,99 1,71	0,19 0,22 0,26
	0,084 0,11 0,17	150 200 300	1 ↓ ↓	1,2 ↓ ↓	0,56 ↓ ↓	1,55 1,45 1,31	1 ↓ ↓	0 ↓ ↓	0,56 ↓ ↓	1,55 1,45 1,31	0,28 0,30 0,34
	0,28 0,42 0,56	500 750 1000	↓ ↓ ↓	↓ ↓ ↓	↓ ↓ ↓	1,15 1,04 1,00	↓ ↓ ↓	↓ ↓ ↓	↓ ↓ ↓	1,15 1,04 1,00	0,38 0,42 0,44
20°			↑	↑	0,43	1,00	↑	1,09	0,70	1,63	0,57
25°					0,41	0,87		0,92	0,67	1,44	0,68
30°			1	1,2	0,39	0,76	1	0,78	0,63	1,24	0,80
35°					0,37	0,66		0,66	0,60	1,07	0,95
40°			↓	↓	0,35	0,57	↓	0,55	0,57	0,93	1,14
Mancais de esfera de autoalinhamento			1	1	0,40	0,4 cot α	1	0,42 cot α	0,65	0,65 cot α	1,5 tg α
Mancais de rolos cônicos de autoalinhamento			1	1,2	0,40	0,4 cot α	1	0,45 cot α	0,67	0,67 cot α	1,5 tg α

Fonte: NORTON, 2013, p. 660.

São fornecidos na tabela 3 os valores de **X**, **Y**, **V** e **e** (equação 5) para encontrarmos o valor da carga de equivalência quando existe a ação combinada de cargas radiais e axiais.

### **2.3 Lubrificação Dos Rolamentos**

Responsável pela importante redução do atrito, a lubrificação também protege o rolamento contra corrosão, contaminantes sólidos e água. Um rolamento corretamente lubrificado e trabalhando nas condições especificadas em projeto, terá vida infinita. O lubrificante forma uma espécie de película que envolve as superfícies dos elementos rolantes evitando o contato metal-metal. A escolha do lubrificante, entre outros fatores, levará em conta as condições ambientais e de velocidade de rotação do eixo. Estima-se que a graxa seja aplicada em 90% dos casos (SKF, 1997 apud MENNA, 2007).

### **2.4 Falhas de componentes mecânicos**

Diz-se que um componente mecânico falha quando o mesmo não é mais capaz de desempenhar sua função com segurança. Analisar falhas em componentes permite identificar os processos que impediram que todas as fases da vida do equipamento fossem cumpridas com sucesso, possibilitando a interrupção de tais processos causadores de falhas, aumentando a confiabilidade (ferramenta que visa a melhoria do desempenho através da redução da probabilidade de falha) dos ativos (AFFONSO, 2014).

Segundo Affonso (2014), as falhas podem ser oriundas de diversas fases de construção, montagem e serviço dos componentes como: projeto, seleção de materiais, fabricação, erros de montagem e instalação e condição de operação ou manutenção inadequadas.

#### **2.4.1 Falhas de projeto**

Falhas causadas por detalhes inapropriados de projeto como entalhes mecânicos. Uma peça destinada a esforços cíclicos pode apresentar fratura por fadiga na região

próxima a um entalhe com pequeno raio que funciona como um concentrador de tensão. Mudanças de projeto feitas sem análise adequada, como trocas de peças que proporcionarão aumento na vibração de máquinas rotativas, assim como fatores não previstos em projeto como corrosão e interação indevida das partes da máquina também podem levar máquinas a falhar.

#### 2.4.2 Falhas na seleção de materiais

Falhas causadas por incompatibilidade do material com as necessidades do serviço. São falhas evitáveis simplesmente trocando-se os materiais. Para cada mecanismo causador de falha existirá um material que funcionará em estado ótimo. É possível ter em determinados componentes de equipamentos, dois mecanismos de falha ocorrendo simultaneamente. Um bom exemplo é um caso de tensões cíclicas em ambiente corrosivo que causará maiores dificuldades na escolha dos materiais, pois a corrosão reduz significativamente a resistência à fadiga dos materiais.

#### 2.4.3 Imperfeições do material

Muitas falhas em componentes têm início em imperfeições do material. Defeitos a níveis microscópicos serão determinantes de falhas catastróficas, uma vez que podem iniciar todo processo de formação de trincas para falha a fadiga em componentes sujeitos a cargas cíclicas. Cada processo de fabricação introduz no material imperfeições características. Peças fundidas podem apresentar inclusões, gotas frias, vazios e porosidades. Forjados podem apresentar dobras, emendas e contrações. E laminados podem apresentar dupla laminação e decoesão laminar.

#### 2.4.4 Deficiências de fabricação

Falhas que ocorrem no processamento dos materiais durante a fabricação dos componentes. Devemos diferenciá-las das falhas já presentes nos materiais conforme citado anteriormente. Conformações a frio, por exemplo, induzem altas tensões residuais que podem comprometer o funcionamento de peças sujeitas a esforços cíclicos. Processos de usinagem e marcações para identificação podem gerar concentradores de tensão. Tratamentos térmicos inadequados podem introduzir em peças propriedades indevidas em sua superfície como redução de resistência à fadiga. Outro processo de fabricação que requer atenção especial é a soldagem. O processo pode gerar desde pequenos concentradores de tensão formados por descontinuidades superficiais, como também defeitos mais sérios como porosidades, trincas e tensões residuais.

#### 2.4.5 Erros de montagem ou instalação

São erros frequentes ligados a falhas humanas. Esse tipo de erro pode ser encontrado em todo tipo de peça. Um erro considerado clássico é o objeto de estudo deste trabalho de conclusão de curso que é inclusão de materiais estranhos (partículas indesejadas, sujeira) ao funcionamento de rolamentos. Também podem ser citados impactos, desalinhamentos, entre outros.

#### 2.4.6 Condições de operação ou manutenção inadequada

São condições de velocidade, cargas, umidade, lubrificação, temperaturas, entre outras não previstas na fase de projeto. Tais condições contribuirão significativamente à falha dos componentes, principalmente se os mesmos forem sujeitos a tensões cíclicas causadoras de falhas por fadiga. Há eventos considerados críticos também como partida e parada de equipamentos onde ocorrem mudanças de velocidade, grandes

gradientes de temperatura, entre outros. Erros de manutenção e operação também são frequentes. Os procedimentos de manutenção e operação devem sempre ser seguidos e revisados mediante análise cuidadosa de sua eficácia.

## **2.5 Análise De Falhas**

Segundo Affonso (2014), a análise de falha de um componente consiste em percorrer a história do mesmo em sentido inverso até que se chegue ao ponto causador da falha para que seja estudado e corrigido, evitando que a falha continue ocorrendo.

Os principais objetivos de uma análise de falhas são: aumentar a disponibilidade dos equipamentos (aumentar sua confiabilidade), reduzir os custos de manutenção e reduzir as perdas por acidentes seja para com os equipamentos, meio ambiente e seres humanos.

A investigação deve determinar as causas das falhas e essas informações devem gerar ações para que as falhas não se repitam. A falha deve ser considerada desde quando o componente não desempenha sua função com segurança e não somente quando há a parada total do equipamento e isso dentro do período de vida útil do equipamento (AFFONSO, 2014).

A análise de falhas deve ser adequada ao tipo de falha e às consequências possíveis. As consequências da falha (perda financeira, ambiental ou humana) devem determinar o tipo de análise. De acordo com as consequências as análises serão feitas superficialmente (falhas não repetitivas e de pequenas consequências) ou de forma mais aprofundada ou detalhada (falhas com grande perda financeira, impacto ambiental ou perda humana), conforme comentado na literatura.

No caso deste trabalho de conclusão de curso a falha estudada poderia causar queda de aeronave com grande perda financeira, grande impacto ambiental e morte, ou seja, foi feita análise detalhada.

### 2.5.1 Levantamento De Dados

É importantíssimo na análise da falha conhecer o componente. Ter seu histórico documentado desde o projeto até a instalação e parâmetros de funcionamento. Segundo Affonso (2014), é aconselhável seguir com a obtenção de dados de projeto (cargas e tensões atuantes, dimensões, folgas, acabamentos, entre outros), fabricação da peça (análise química, processos de fabricação e de conformação), histórico operacional (ambiente de trabalho da peça, eventuais acidentes ou impactos, vazão, pressão, entre outros), histórico de manutenção e vibração (espectros de frequência, relatórios de serviços de manutenção), registros fotográficos, selecionar amostras para análise, histórico de condições anormais de operação e descrição do mecanismo envolvido na falha (movimento relativo entre superfícies envolvidas na falha, por exemplo).

### 2.5.2 Testes e Inspeções

As peças que falharam devem passar por rigoroso ensaio visual antes de qualquer limpeza porque resíduos podem estar inclusive entre as causas de falha no caso de um rolamento, por exemplo. A superfície de falha deve ser preservada e protegida contra corrosão, conforme cita a literatura (AFFONSO, 2014).

Segundo Affonso (2014), de forma genérica, devem ser seguidas as seguintes etapas para uma análise de falha completa: inspeção visual e fotografias (atenção especial deve ser dada à face da fratura no ensaio visual e as fotografias servem para registrar a fratura para comparações posteriores), testes não-destrutivos (servem para detectar algum detalhe da fratura que não pode ser observado a olho nu), testes mecânicos (podem ser feitos testes de dureza, impacto, tração, dependendo sempre do tipo de material e fratura), análises químicas do material base e de possíveis resíduos



encontrados na fratura (um resíduo na face fraturada pode revelar por que a peça falhou) e, se possível, uma reconstituição de eventos acontecidos antes da peça falhar.

Outro cuidado especial é o de focar a análise no primeiro componente a falhar e não nas outras falhas que são consequências da primeira, chegando-se assim ao modo de falha mais facilmente.

Todas as etapas da análise devem ser registradas através de relatórios e arquivadas juntamente com todos os dados dos equipamentos e histórico de funcionamento (AFFONSO, 2014).

### 2.5.3 Prevenção das Falhas

Com a análise concluída, chega o momento de executar as ações preventivas da falha que podem ser apenas revisões de procedimentos de operação ou manutenção, treinamento de pessoal ou até mesmo substituição definitiva de um equipamento. Deve ser feita análise cuidadosa das possíveis consequências das ações e sua relação custo-benefício também deve ser avaliada (AFFONSO, 2014).

### 2.5.4 Avaliação e Monitoração

Após serem executadas as ações que venham prevenir as falhas é preciso avaliá-las quanto à sua eficácia. O ideal é definir indicadores que podem ser verificados periodicamente como tempo médio entre falhas, tempo médio para reparos e custo de manutenção. Melhorias nesses indicadores indicam melhorias no quadro geral de manutenção ou aumento da confiabilidade de um ativo porque se aumenta a probabilidade do mesmo continuar desempenhando adequadamente sua função (AFFONSO, 2014).

Entre as ações que venham impedir que as falhas se repitam também pode ser implementado um programa de manutenção preventiva e/ou preditiva para que se evite o surgimento de novas falhas previsíveis. Isto pode ser feito monitorando-se o equipamento quanto ao seu desempenho com levantamento de dados de operação como pressão, temperatura, vibração, valores de corrente elétrica, rotação, entre outros fatores que vão depender do tipo de equipamento. O uso de alarmes para condições de funcionamento alteradas de determinados equipamentos (principalmente os críticos para o processo) também deve ser utilizado. Ações preventivas também devem ser tomadas. Estas devem ser aplicadas independentes do estado do equipamento em períodos determinados através de monitoração preditiva (AFFONSO, 2014).

É importante também para a confiabilidade de um ativo a participação do pessoal da operação. Estes devem ser treinados quanto às condições de funcionamento em estado ótimo dos equipamentos e para tomar possíveis ações quando do início de algum estado de anormalidade (AFFONSO, 2014).

## **2.6 Fadiga**

Um processo progressivo e localizado de modificação estrutural permanente de um material que ocorre devido a condições que produzam tensões e deformações flutuantes em algum ou alguns pontos, e que pode culminar na formação de trincas ou fratura completa da peça, após um número suficientemente grande de ciclos. (AFFONSO, 2014, p 43).

Conforme a literatura, é um processo que se desenvolve ao longo do tempo mesmo com a fratura final ocorrendo subitamente. O mecanismo de fadiga pode ser iniciado em um único ponto e a ruptura final se dá a partir de certo tamanho de trinca em que o material não suporta mais as cargas aplicadas.

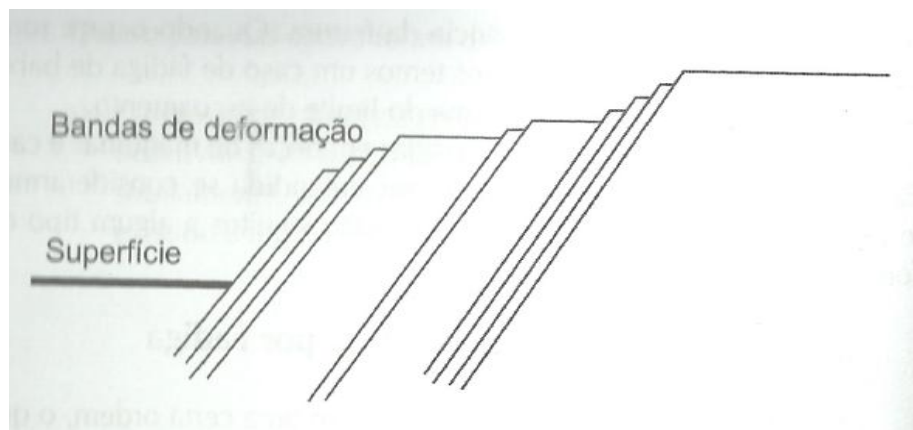
Ocorre em componentes expostos a tensões cíclicas de forma inesperada a tensões abaixo do nível de escoamento do material. Todos os materiais empregados na engenharia estão sujeitos ao mecanismo de falha por fadiga. Fatores geométricos (geometria da peça, descontinuidades de soldagem, marcas de ferramenta, geometria a níveis microscópicos), amplitude das cargas aplicadas (o número de ciclos para a falha

por fadiga diminui com o aumento da tensão aplicada), propriedades dos materiais e número de ciclos são fatores determinantes da resistência à fadiga do componente mecânico (PELLICCIONE, 2012).

Segundo Pelliccione (2012), inclusões presentes no material podem acelerar o aparecimento e desenvolvimento da trinca por fadiga. Materiais de fabricação antiga apresentam grande número de inclusões que encurtam a vida dos materiais.

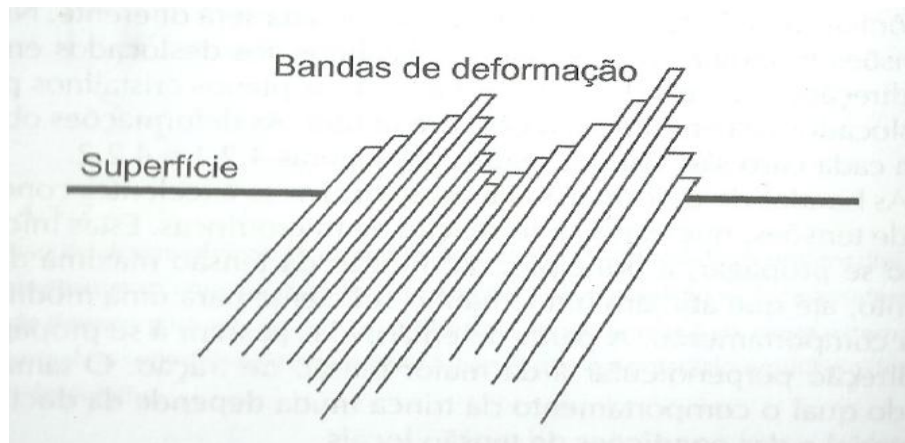
Os materiais metálicos são constituídos por estruturas cristalinas. Essas estruturas são divididas em grãos e cada grão possui sua direção de organização (cristalização). Isso significa que em certos planos, determinadas regiões dessa estrutura terão mais facilidade de deformar devido a planos de escorregamento formados. Os grãos que tiverem seus planos de escorregamento alinhados com a tensão de cisalhamento aplicada serão os primeiros a se deformar. No caso de tensões constantes aplicadas em uma única direção, a deformação se dará também numa só direção. No caso de tensão alternada, a deformação se dará em duas direções, formando pequenas bandas de deformação com grande concentração de tensões, nucleando a formação de microtrincas. Essas microtrincas irão se propagar ao longo do tempo em direção perpendicular à tensão de tração até atingirem tamanho em que o material não suporte mais as tensões ocorrendo então a falha catastrófica (AFFONSO, 2014).

Figura 2 - Deformações microscópicas – tensões em uma só direção. Planos atômicos deslocados pela tensão cisalhante.



Fonte: AFFONSO, 2014, p 46.

Figura 3 - Deformações microscópicas – tensões alternadas. Planos deslocados na direção da tensão de cisalhamento, que muda constantemente de sentido.



Fonte: AFFONSO, 2014, p 46.

Segundo Norton (2013), falhas por fadiga sempre tem início com uma pequena trinca que pode ter origem na microestrutura do material, porque em níveis microscópicos os materiais metálicos não são homogêneos possuindo concentradores de tensão. Uma região no equipamento que combine estas características com tensões cíclicas (que variam substancialmente com o tempo) tem grande potencial de falhar por fadiga.

A falha por fadiga pode ser dividida em três estágios: início da trinca (de pequena duração, também chamada de nucleação), propagação da trinca (maior tempo da vida da peça e se deve a tensões de tração) e ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca (instantâneo).

Segundo Affonso (2014), no primeiro estágio, chamado de nucleação, se dá a deformação plástica localizada ao longo de planos de deslizamento na direção das forças de cisalhamento. Não é visível a olho nu porque é da dimensão de alguns poucos grãos.

No segundo estágio, ocorre o crescimento da trinca em plano perpendicular ao das forças de tração. A parte da face da fratura correspondente a este estágio geralmente é a maior, embora não seja maior a quantidade de ciclos que pertence ao primeiro estágio (AFFONSO, 2014).

O terceiro e último estágio é o rompimento brusco e frágil do material quando a trinca atinge o tamanho crítico para deformação instável. A área correspondente a este estágio é proporcional aos níveis de tensão que a peça está sujeita. Maiores áreas indicam que maiores tensões foram aplicadas, visto que a mesma tem aspecto frágil (AFFONSO, 2014).

Quanto à morfologia de uma trinca de fadiga, o aspecto mais característico são as marcas de praia que convergem para o início da trinca e do outro lado estará a fratura frágil que corresponde ao terceiro estágio. As marcas de praia representam os ciclos de início e parada do crescimento da trinca. Não confundir as marcas de praia com estrias que representam, a nível microscópico, a alternância de aplicação da carga cíclica (AFFONSO, 2014).

A resistência à fadiga de um material geralmente é maior para tensão de ruptura maior, porém isso não dá à peça confeccionada com material de alta tensão de ruptura a condição de escapar do fenômeno de fadiga. Por ser um processo localizado, o fenômeno de fadiga valoriza alguns aspectos como acabamento superficial, corrosão, tensões residuais devido a soldagem, concentradores de tensão, dentre outros. Para maiores magnitudes de cargas, materiais em geral suportarão um menor número de ciclos se comparados com cargas menores para os mesmos materiais (AFFONSO, 2014).

Segundo Affonso (2014), podemos citar como fatores que influenciam diretamente na resistência a fadiga:

Acabamento superficial - pequenas imperfeições podem nuclear uma microtrinca de fadiga dando origem a todo o processo. Uma superfície polida apresenta maior resistência à fadiga do que uma usinada.

Tensões residuais – tensões atuantes na peça podem se sobrepor a tensões residuais provenientes de processos de soldagem, por exemplo, e ter efeito bastante expressivo na resistência a fadiga.

Corrosão – produz grande alteração superficial gerando concentradores de tensão.

Concentradores de tensão – roscas, cantos vivos, entre outros, geram grandes tensões localizadas propiciando o processo de nucleação de trincas.

Tamanho das peças – a resistência a fadiga diminui com o aumento da dimensão das peças. Maiores áreas propiciam maior possibilidade de planos de deslizamento para a nucleação de trincas.

## 2.7 Fadiga Superficial

Quando duas superfícies estão em contato por rolamento puro, ou combinados com porção pequena de deslizamento, o mecanismo de falha de superfície chama-se fadiga superficial (NORTON, 2013).

Se a carga é aplicada acima do escoamento, ou seja, na zona plástica do material, a deformação na região de contato será um achatamento permanente na esfera chamado de falso brinelismo (false brinelling, por parecer com deformação causada por ensaio de dureza Brinell) e inutiliza o rolamento.

Precisamos diferenciar a fadiga dita convencional que está relacionada a distribuição de tensão (fadiga estrutural) por determinados volumes como eixos, por exemplo, da fadiga superficial que está relacionada a esforços localizados com pequenas áreas de contato entre as superfícies envolvidas no movimento relativo. A validade dessa separação deve respeitar duas condições: as dimensões da área de contato devem ser pequenas quando comparadas às dimensões dos corpos em contato e com o raio relativo de curvatura das superfícies. (BRUNETTI, 2008 APUD JOHNSON, 1985).

Segundo a literatura, este tipo de fadiga acontece em contatos cíclicos localizados que resultam em acúmulo de deformações elásticas que após certo número de ocorrências, pode gerar a nucleação da trinca de fadiga. Algumas peças sujeitas a este tipo de fadiga: esferas, rolos e pistas de rolamentos, cames, dentes de engrenagens, cilindros de laminação, trilhos e rodas ferroviárias, entre outros.

Neste tipo de fadiga não existirá uma carga abaixo da qual nunca haverá falha por fadiga, mesmo para aços. No movimento de rolamento puro entre um elemento rolante e uma pista (desconsiderando o micro deslizamento existente), a força de cisalhamento máxima está logo abaixo da superfície. Para movimento de deslizamento

relativo, a tensão de cisalhamento ocorre na superfície. Em casos de atuação mista de deslizamento e rolamento, a força de cisalhamento resultante dependerá da magnitude do atrito provocado entre as partes (VANEGAS, ÁLVAREZ E SOUZA 2009).

Segundo Affonso (2014), fadiga superficial é o caso de fadiga que geralmente ocorre em rolamentos (também é motivo de preocupação para o setor ferroviário, fabricantes de cilindros de laminação, de cames, de engrenagens e também a indústria de fundição) onde temos alta tensão de contato devido as peças rolarem umas sobre as outras. O contato entre superfícies rolantes gera tensões subsuperficiais, conhecidas como Hertzianas, que podem gerar falha por fadiga com o contato intermitente. Podemos pensar em uma gelatina quando pressionada por superfície convexa (colher) e a mesma desliza para os lados, mostrando a presença de tensões de cisalhamento. Em casos mais comuns irão nuclear trincas logo abaixo da superfície ou na superfície e se propagarão gerando remoção de camada superficial caracterizando o descascamento que é uma falha clássica de rolamentos.

Existem similaridades e diferenças entre a fadiga dita estrutural e a fadiga de contato. Como semelhança podemos citar a aplicação de tensões cíclicas que causam a fratura por fadiga, a vida do componente variando inversamente com a tensão aplicada e as dispersões estatísticas na durabilidade dos componentes. Como diferenças podemos citar que na fadiga de contato as dispersões estatísticas são bem maiores que na estrutural; na fadiga estrutural existe limite de tensão para que o componente não venha a falhar por fadiga, o que não existe para a fadiga de contato (BRUNETTI, 2008 APUD RABINOWICZ, 1965).

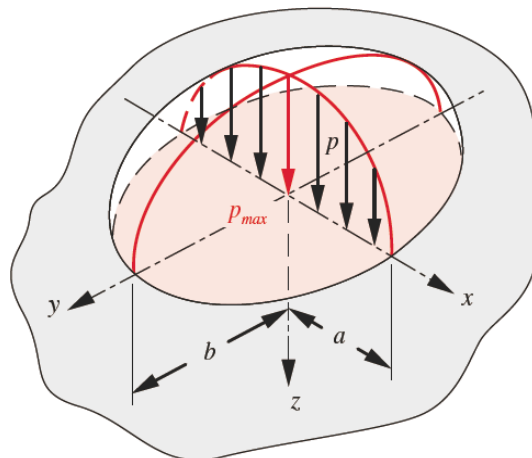
Uma inclusão posicionada entre as superfícies pode ser o ponto inicial de deformação localizada onde a trinca será nucleada e se propagará pelo material até o desprendimento de uma lasca da superfície. Com a evolução da trinca pode ocorrer desprendimento de pequenas partículas de material da superfície, conhecido como "pitting" (crateração). Geralmente, o pitting é seguido da perda de grandes quantidades de material conhecido como "spalling" (descascamento). (VANEGAS, ÁLVAREZ E SOUZA, 2009).

Quando em funcionamento, tensões de contato ocorrem no anel interno, no elemento rolante e no anel externo. Se o mancal estiver limpo, lubrificado, corretamente

montado, corretamente vedado e operar em condições razoáveis, a fadiga será a única causa de falha. Por isso a vida de um mancal de rolamento é expressa em número de revoluções do anel interno ou número de horas de operação até a primeira evidência de fadiga. Falhas por fadiga consistem em lascagem das superfícies que suportam as cargas (BUDYNAS E NISBETT, 2011).

Considerando uma esfera rolando por uma superfície, com carga abaixo do ponto de escoamento, com deformação na zona elástica e com o mesmo ponto da esfera entrando novamente em contato com a superfície a cada revolução sucessiva, as tensões resultantes na região de contato são denominadas tensões de contato ou tensões de Hertz. As tensões de pequeno contato são repetidas na frequência de rotação o que levará à fadiga superficial. Como já citado acima, existe uma tensão de cisalhamento associada a essas tensões de compressão que são a causa de trincas após muitos ciclos de tensão. O crescimento das trincas pode resultar crateração (pitting) que é caracterizada pela remoção de pequenas porções de material da superfície. Quando esse processo se inicia, rapidamente passa para lascamento ou descascamento (spalling) que é caracterizado por perda de porções maiores de material da superfície (NORTON, 2013).

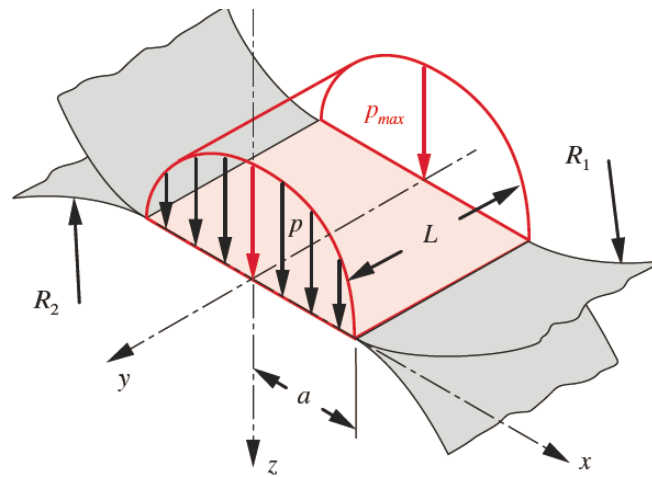
Figura 4 - Distribuição de pressão elipsoidal no contato geral – para contato esférico  $a=b$ .



Fonte: NORTON, 2013, p. 437.

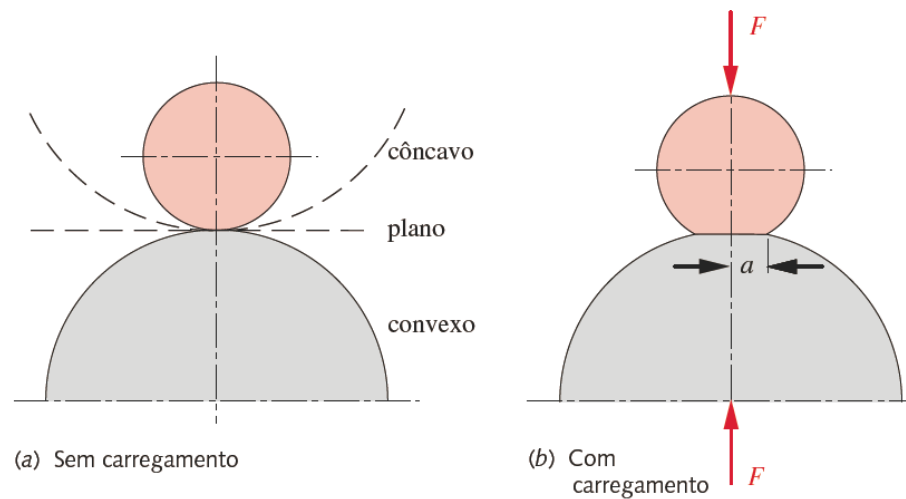


Figura 5 - Distribuição de pressão elipsoidal prismática no contato cilíndrico.



Fonte: NORTON, 2013, p. 437.

Figura 6 - Zona de contato entre duas esferas ou cilindros



Fonte: NORTON, 2013, p. 439.

As linhas tracejadas na figura 6 indicam a possibilidade de um dos corpos ter uma superfície plana ou cavidade esférica dependendo do sinal de seu raio de curvatura (se positivo, convexo e se negativo, côncavo).

De acordo com Norton (2013), no contato entre esferas (figura 4 para  $a=b$ ) a pressão de contato é máxima no centro ( $P_{max}$ ). A carga  $F$  aplicada na região de contato (figura 4) é igual ao volume da semielipsóide de revolução de raio “a”:

$$F = \frac{2}{3} \pi a^2 P_{max} \quad (7)$$

Portanto, temos a máxima pressão como:

$$P_{max} = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi a^2} \quad (8)$$

A pressão média é a força de contato dividida pela área de contato

$$P_{média} = \frac{F}{\text{área}} = \frac{F}{\pi a^2} \quad (9)$$

Substituindo a parte que representa a força sobre a área, temos:

$$P_{max} = \frac{3}{2} P_{média} \quad (10)$$

Precisamos definir as constantes de material para as esferas

$$m_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \quad m_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (11)$$

Onde  $E1$  e  $E2$  são os módulos de elasticidade e  $\nu1$  e  $\nu2$  são os coeficientes de Poisson, ambos característicos dos materiais das esferas 1 e 2.

A área de contato deve ser muito pequena se comparada aos raios de curvatura dos corpos, o que permite considerá-los constantes na região de contato, podendo-se definir uma constante geométrica que depende apenas dos raios  $R1$  e  $R2$  das duas esferas:

$$B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (12)$$

Para termos o caso de esfera contra plano,  $R2$  se torna infinito, fazendo  $1/R2$  igual a zero. Para um contato esfera contra cavidade esférica,  $R2$  torna-se negativo. O raio da região de contato  $a$  é:

$$a = \frac{\pi}{4} P_{max} \frac{m_1 + m_2}{B} \quad (13)$$

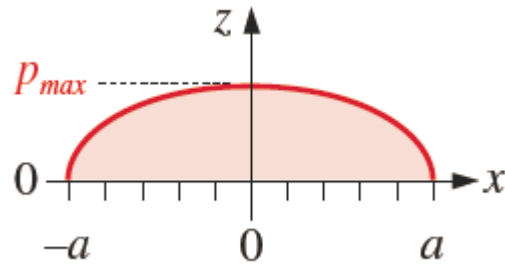
Substituindo  $P_{max}$  na equação 13 pela equação 8:

$$a = \frac{\pi}{4} \left( \frac{3}{2} \frac{F}{\pi a^2} \right) \frac{m_1 + m_2}{B} \quad a = \sqrt[3]{0,375 \frac{m_1 + m_2}{B} F} \quad (14)$$

Distribuição dentro da semi-helipsoide:

$$p = P_{max} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}} \quad (15)$$

Figura 7 - Distribuição de pressão na região de contato.



Fonte: NORTON, 2013, p. 440.

Ainda segundo NORTON (2013), a pressão na região de contato cria um estado triplo de tensões no material. As três tensões aplicadas  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  (equações 16 e 17) são de compressão e são máximas na superfície da esfera, no centro da região de contato. Elas diminuem com a profundidade e a distância do eixo de contato. Essas tensões são as tensões Hertzianas já mencionadas acima e são as tensões principais que variam ao longo do eixo  $z$  (com  $z$  crescendo para dentro do material):

$$\sigma_z = P_{max} \left[ -1 + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right] \quad (16)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{P_{max}}{2} \left[ -(1 + 2\nu) + 2(1 + \nu) \left( \frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \right) - \left( \frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \right)^3 \right] \quad (17)$$

As tensões normais e principais (equações 18 e 19) são máximas na superfície onde  $z$  é 0:

$$\sigma_{z_{max}} = -P_{max} \quad (18)$$

$$\sigma_{x_{max}} = \sigma_{y_{max}} = -\frac{1 + 2\nu}{2} P_{max} \quad (19)$$

Tensão de cisalhamento (equação 20 e 21) não é máxima na superfície, mas é máxima logo abaixo, em função da distancia  $Z_{@T_{max}}$  (equação 22):

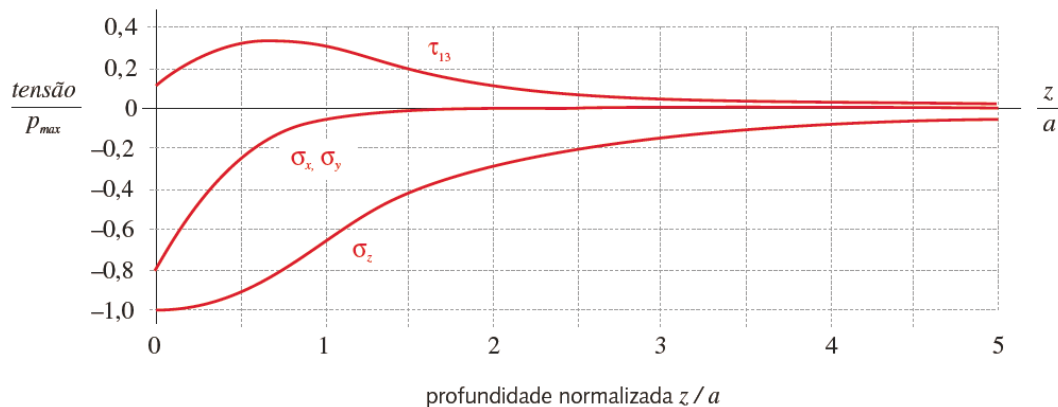
$$\tau_{13} = \frac{P_{max}}{2} \left[ \frac{(1-2\nu)}{2} + (1+\nu) \left( \frac{z}{\sqrt{a^2+z^2}} \right) - \frac{3}{2} \left( \frac{z}{\sqrt{a^2+z^2}} \right)^3 \right] \quad (20)$$

$$\tau_{13_{max}} = \frac{P_{max}}{2} \left[ \frac{(1-2\nu)}{2} + \frac{2}{9}(1+\nu)\sqrt{2(1+\nu)} \right] \quad (21)$$

$$z_{@T_{max}} = a \sqrt{\frac{2+2\nu}{7-2\nu}} \quad (22)$$

Na figura 8 (gráfico), as tensões diminuíram para < 10% da  $P_{max}$  quando  $z = 5a$ . A máxima tensão de cisalhamento logo abaixo da superfície pode ser vista. Se ambos os materiais são aço, ela ocorre a uma profundidade por volta de  $0,63a$  e é próxima a  $0,34 P_{max}$ . Na superfície,  $z = 0$ , a tensão de cisalhamento fica em torno de  $0,11 P_{max}$ .

Figura 8 - gráfico das tensões principais normais e a máxima tensão de cisalhamento, em função da profundidade  $z$ , ao longo do raio da esfera



Fonte: NORTON, 2013, p. 441.

Ainda segundo Norton (2013), a localização logo abaixo da superfície da máxima tensão de cisalhamento é um fator significativo na falha por fadiga superficial. As trincas teriam início abaixo da superfície e cresceriam até que o material acima se rompesse, caracterizando o efeito de crateração.

De acordo com a literatura, no caso de contato cilindro-cilindro os cálculos mudam pouco em função da mudança do formato da área de contato. A região de contato será retangular, mostrado em figura acima. A pressão de contato é máxima  $P_{max}$  no centro. A força aplicada  $F$  na região de contato é igual ao volume do prisma semielíptico:

$$F = \frac{1}{2} \pi a L p_{max} \quad (23)$$

Onde  $F$  é a força total aplicada e  $L$  é o comprimento do contato ao longo do eixo dos cilindros. Logo:

$$P_{max} = \frac{2F}{\pi a L} \quad (24)$$

A pressão média é a força sobre a área da região de contato

$$P_{média} = \frac{F}{\text{área}} = \frac{F}{2aL} \quad (25)$$

Substituindo

$$P_{max} = \frac{4}{\pi} P_{média} \cong 1,273 P_{média} \quad (26)$$

Definindo constante geométrica que depende dos raios  $R_1$  e  $R_2$  dos dois cilindros como foi feito para contato esfera-esfera:

$$B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (27)$$

Para um cilindro sobre um plano,  $R_2$  se torna infinito, fazendo-se  $1/R_2$  igual a zero. Para um contato entre uma cavidade cilíndrica e um cilindro convexo, basta  $R_2$  ser negativo. Caso contrário,  $R_2$  é finito e positivo, como  $R_1$ . A metade da largura  $a$  da área de contato é:

$$a = \sqrt{\frac{2 m_1 + m_2}{\pi} \frac{F}{B L}} \quad (28)$$

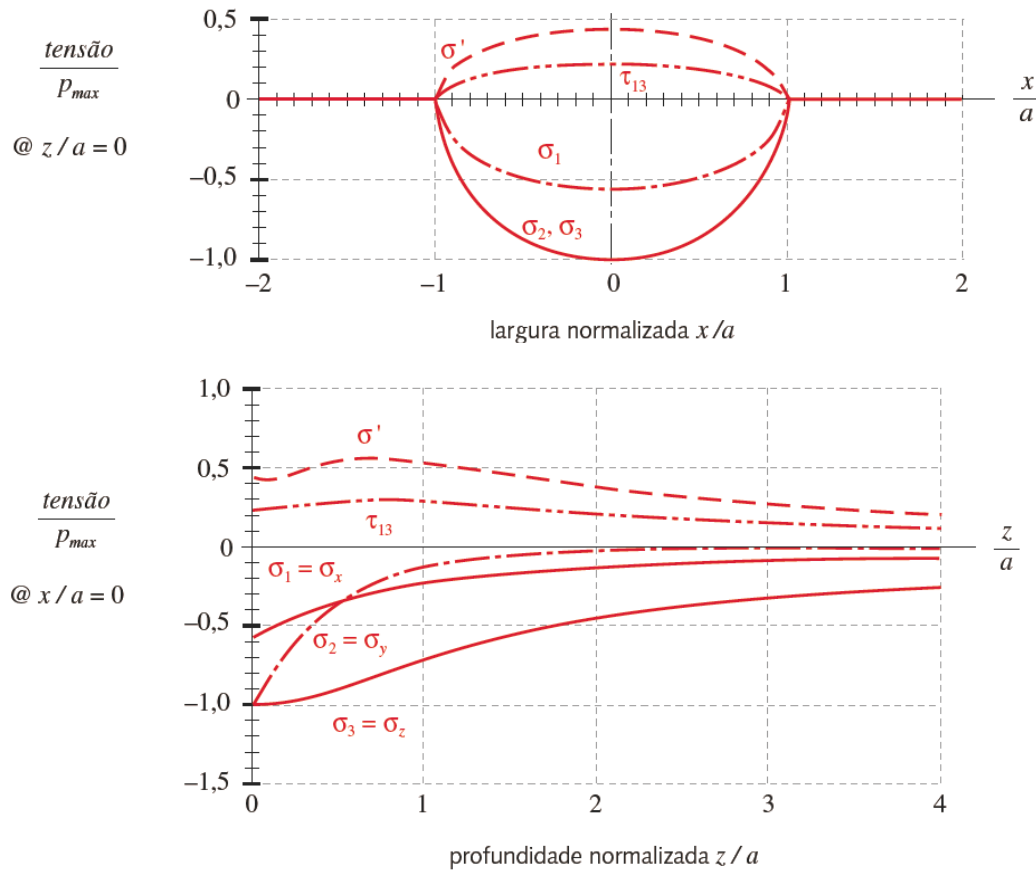
Onde  $m_1$  e  $m_2$  são constantes do material.

Distribuição das pressões dentro do prisma semi-elíptico:

$$p = p_{max} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (29)$$

A figura 9 mostra as distribuições das tensões principais, de cisalhamento máxima e de Von Mises através da largura da região de contato na superfície e ao longo do eixo  $z$  (onde elas são maiores), para dois cilindros sob carregamento estático ou em rolamento puro. As tensões normais são todas de compressão e máximas na superfície. Elas diminuem rapidamente com a profundidade no material e também diminuem ao se afastar da linha de centro (NORTON, 2013).

Figura 9 - Distribuições das tensões principais, de cisalhamento máxima e de von Mises para cilindros de aço sob carregamento estático ou em rolamento puro.



Fonte: NORTON, 2013, p. 446.

Pode ser observado novamente, através da figura 9 que a máxima tensão de cisalhamento fica logo abaixo da superfície de contato ratificando a teoria exposta acima.

Ainda segundo Norton (2013), quando os corpos em contato têm formas curvas quaisquer, a região de contato é elíptica e a distribuição de pressões é um semi-elipsoide. Os cálculos serão parecidos para os dois casos já citados acima levando-se em consideração a geometria da área de contato.

Considerando  $a$  e  $b$  como semidiâmetros da área de contato que será elíptica, que a força aplicada será igual ao volume do semi-elipsoide, que a pressão é igual a força sobre a área, que a pressão é máxima no centro da área de contato e trabalhando substituição nas equações, temos:



$$F = \frac{2}{3} \pi ab p_{max} \quad (30)$$

$$p_{max} = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi ab} \quad (31)$$

$$p_{m\u00e9dia} = \frac{F}{\text{\u00e1rea}} = \frac{F}{\pi ab} \quad (32)$$

$$p_{max} = \frac{3}{2} p_{m\u00e9dia} \quad (33)$$

Devem ser definidas duas constantes geom\u00e9tricas que dependem dos raios de curvatura dos dois corpos (equa\u00e7\u00f5es 33 e 34):

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right) \quad (34)$$

$$B = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right)^2 + 2 \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right) \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right) \cos 2\theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (35)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left( \frac{B}{A} \right) \quad (36)$$

Onde  $R_1$ ,  $R_1'$ ,  $R_2$  e  $R_2'$  s\u00e3o raios principais de curvatura do corpo 1 e do corpo 2.  $\theta$  \u00e9 \u00e2ngulo entre os planos contendo  $R_1$  e  $R_2$ .

Dimensões da região de contato a e b (equações 37 e 38):

$$a = k_a \sqrt[3]{\frac{3F(m_1 + m_2)}{4A}} \quad (37)$$

$$b = k_b \sqrt[3]{\frac{3F(m_1 + m_2)}{4A}} \quad (38)$$

Onde  $m_1$  e  $m_2$  são constantes do material e  $k_a$  e  $k_b$  são obtidos na tabela 4 de acordo com o valor do ângulo (equação 36).

Tabela 4 - Fatores  $K_a$  e  $K_b$  para aplicação nas equações das dimensões a e b da região de contato

$\phi$	0	10	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$k_a$	$\infty$	6,612	3,778	2,731	2,397	2,136	1,926	1,754	1,611	1,486	1,378	1,284	1,202	1,128	1,061	1
$k_b$	0	0,319	0,408	0,493	0,530	0,567	0,604	0,641	0,678	0,717	0,759	0,802	0,846	0,893	0,944	1

Fonte: NORTON, 2013, p. 449.

Como nos outros casos, as tensões normais (principais) são de compressão e são máximas na superfície.

$$\sigma_x = -\left[2\nu + (1 - 2\nu)\frac{b}{a + b}\right]p_{max} \quad (39)$$

$$\sigma_y = -\left[2\nu + (1 - 2\nu)\frac{a}{a + b}\right]p_{max} \quad (40)$$

$$\sigma_z = -p_{max} \quad (41)$$

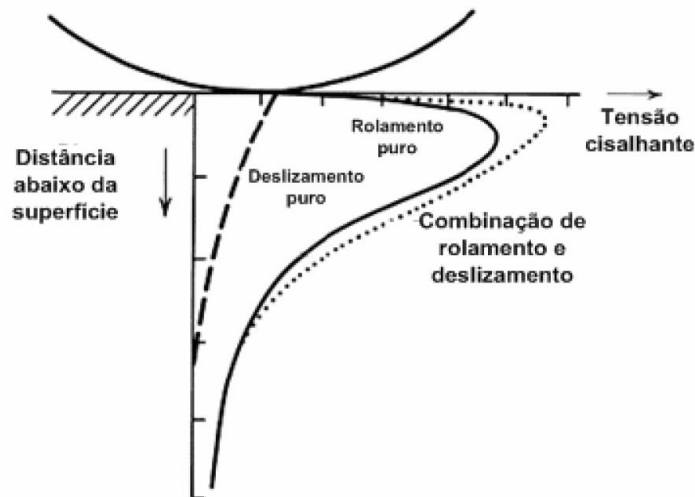
A máxima tensão de cisalhamento na superfície, associada a essas tensões

$$\tau_{13} = \frac{|\sigma_1 - \sigma_3|}{2} \quad (42)$$

Como nos outros casos, ela ocorre imediatamente abaixo da superfície. Sua profundidade depende da razão entre os semidiâmetros da elipse de contato.

Para  $b/a = 1,0$ , a maior tensão de cisalhamento ocorre em  $z = 0,63a$ , e para  $b/a = 0,34$  em  $z = 0,24a$ . A magnitude de seu pico é, aproximadamente,  $0,34 P_{\max}$  (NORTON, 2013).

Figura 10 - Representação esquemática da distribuição de tensões de cisalhamento abaixo do contato nas situações de rolamento puro, deslizamento ou combinação de ambos.



Fonte: VANEGAS, ÁLVAREZ E SOUZA, 2009, Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 17 Nº 3, 2009, pp. 423-431.

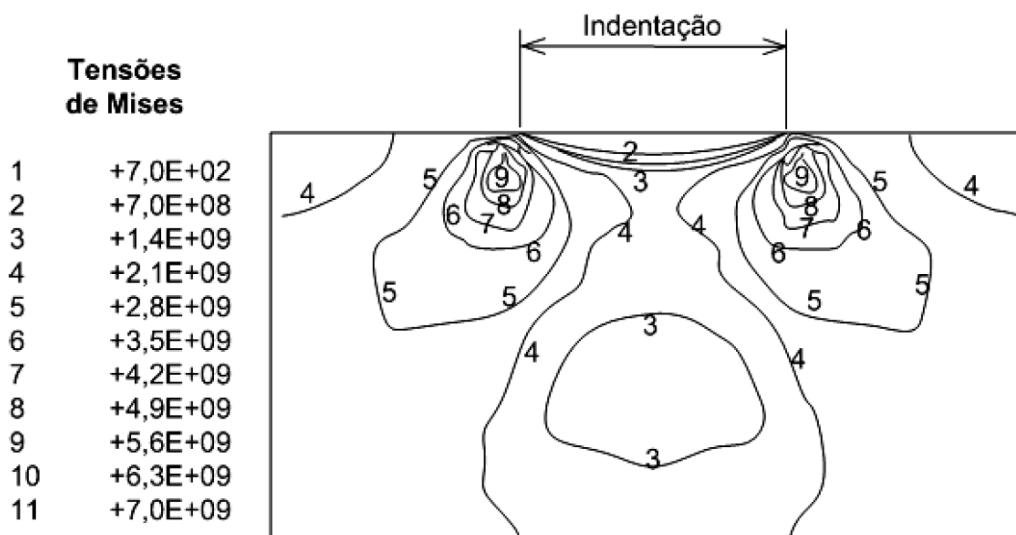
Na figura 10, podemos observar claramente que a tensão de cisalhamento máxima no caso de rolamento puro localiza-se abaixo da superfície para deslizamento puro, na superfície. E, no caso de combinação, a localização dependerá do atrito causado pelo deslizamento e ficará mais próxima à superfície se comparada com rolamento puro. A ocorrência das trincas subsuperficiais relaciona-se com a máxima tensão cisalhante que ocasiona escoamento plástico nucleando as trincas. Por isso

existe a preocupação dos fabricantes de rolamentos quanto à qualidade dos materiais (BRUNETTI, 2008).

Atualmente, com processos mais modernos, é possível a obtenção de materiais mais “limpos”, ou seja, com baixo nível de inclusões (NORTON, 2013). O aumento da qualidade dos materiais combinado com o aumento das solicitações mecânicas em componentes sujeitos a fadiga de contato tem levado o modo de falha da subsuperfície para a superfície de contato. Assim, torna-se importantíssimo o acabamento superficial e os cuidados quanto à limpeza na montagem dos rolamentos, pois marcas de usinagem, rugosidade excessiva, e indentações produzidas por partículas de desgaste serão os concentradores de tensão que nuclearão as trincas que causarão as falhas dos componentes (BRUNETTI, 2008).

Segundo Brunetti (2008), BASTIAS et al (1994) introduziram impressões de ensaio de dureza em superfícies sujeitas a falhas por fadiga de contato e submeteram tais superfícies a ensaio de fadiga. Esses pesquisadores observaram que a distribuição das tensões de contato não é uniforme ao redor da impressão, mas existe concentração de tensão nas laterais da impressão.

Figura 11 - Distribuição de tensões ao redor de uma impressão de dureza introduzida na trilha de desgaste.



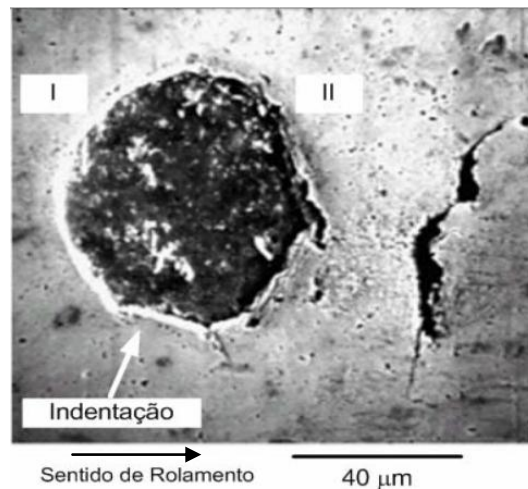
Fonte: (BRUNETTI, 2008, p. 46 APUD BASTIAS et al, 1994).

Esses pesquisadores, realizando ensaios em condições de contato rugoso, verificaram que o tempo necessário à nucleação de trincas e o tempo de vida dos componentes foram reduzidos em mais de uma ordem de grandeza quando comparados a ensaios com superfícies polidas. Esses resultados mostram que para superfícies rugosas e para presença de outros defeitos superficiais a nucleação de trincas será favorecida porque mais concentradores de tensão estarão disponíveis para atuação. Por outro lado, em superfícies isentas de defeitos a nucleação de trincas será dificultada.

Segundo Brunetti (2008), DOMMARCO et al (2006) ao estudarem superfícies sujeitas a fadiga de contato com defeito artificial introduzido na trilha de desgaste, observaram que as cargas cíclicas podem produzir pequeno fluxo de material na direção de rolamento. Conforme observado na figura abaixo, as tensões normais empurram as bordas da impressão, mas a deformação plástica varia conforme a região. Na região I a deformação ocorre para dentro da cavidade e na região II a borda também é deslocada para frente porém não há a cavidade para “acomodar” a deformação, resultando em deformação mais severa nucleando a trinca.

Ainda segundo Brunetti (2008), DOMMARCO et al (2006), concluem que a região I está sob tensões compressivas e a região equivalente II está sob tração. Portanto, as bordas dos defeitos aumentam a quantidade de material que precisa ser acomodado durante a aplicação das tensões cíclicas gerando deformação plástica característica com conseqüente nucleação de trincas de fadiga de contato.

Figura 12 - Trinca nucleada à frente de uma impressão de dureza produzida na trilha desgaste de um aço SAE 52100 temperado



Fonte: BRUNETTI, 2008, p. 48 APUD DOMMARCO et al, 2006).

## 2.8 Análise de Falhas em Rolamentos

A vida dos rolamentos será calculada levando-se em consideração que serão lubrificados por óleo em quantidade e qualidade adequadas e sem presença de contaminantes, que serão montados estritamente de acordo com procedimentos previamente verificados, que serão respeitadas todas as suas dimensões inclusive tolerâncias e que não apresentem defeitos.

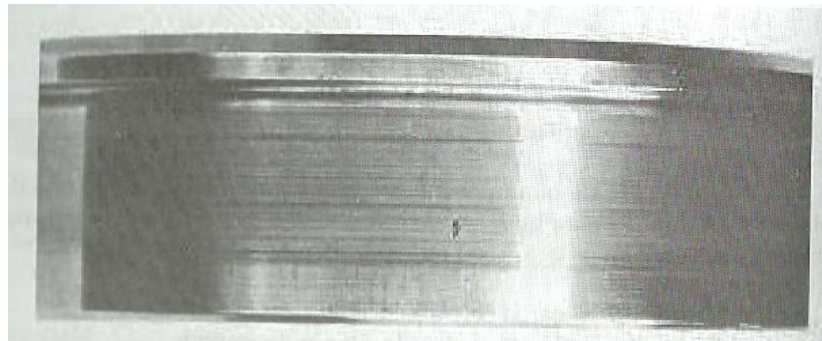
Segundo Norton (2013), a falha não necessariamente se dá com a parada total do rolamento. O mesmo, com o início da falha, pode continuar funcionando, porém emitirá forte ruído devido ao atrito que aumentará consideravelmente. A quebra, a partir desse momento, poderá ocorrer a qualquer hora.

Combinando condições de viscosidade do lubrificante, velocidade e cargas, é formado o filme de óleo entre as partes metálicas. A formação do filme de óleo é possível porque os lubrificantes possuem a propriedade de ter sua viscosidade aumentada com o aumento da pressão causado pelas superfícies em contato. A água, por exemplo, não possui esta propriedade, o que a torna um contaminante fatal à lubrificação, assim, uma pequena quantidade já afeta a lubrificação causando o contato metal-metal.

Como a espessura do filme de óleo é muito pequena qualquer espécie de contaminação ou de partículas estranhas se tornarão concentradores de tensão que irão facilitar a falha por fadiga (AFFONSO, 2014).

Segundo Affonso (2014), a análise de falhas em rolamentos deve começar pelo levantamento de dados de operação como velocidade e carga de trabalho, temperatura, entre outros e depois levantamento de histórico de falhas semelhantes, alinhamento dos eixos e mancais, características e condições dos lubrificantes e potenciais fontes de contaminação, além de serem feitas inspeções na superfície de fratura. Análise da vibração do rolamento pode detectar vibrações características de início de falha através de frequências características. Grande ruído caracteriza evolução do estágio inicial da falha. O tempo entre o início e o final da falha dependerá das cargas aplicadas e da velocidade de funcionamento.

Figura 13 - Pista interna de rolamento mostrando início de afloramento de trinca de fadiga superficial



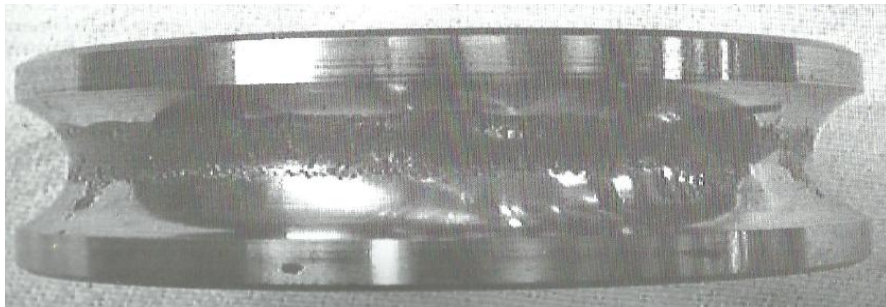
Fonte: AFFONSO, 2014, p.166.

Figura 14 - Descascamento causado por fadiga superficial



Fonte: AFFONSO, 2014, p.167.

Figura 15 - Dano acentuado devido a fadiga superficial



Fonte: AFFONSO, 2014, p.167.

Segundo Affonso (2014), a maior parte de falhas de rolamentos não está relacionada com o fim de sua útil, mas sim devido a algumas causas mais específicas como: assentamentos defeituosos no eixo ou desalinhamento, ajustes incorretos, lubrificação inadequada, selagem ineficaz, vibração quando o mancal não está rodando, passagem de corrente elétrica, deficiências de projeto e o estudo de caso deste trabalho de conclusão de curso que é procedimento de montagem incorreto.

Os principais fatores que constituem uma montagem de rolamento incorreta são presença de sujeira que podem proporcionar partículas contaminantes e o uso de ferramentas e força indevidas gerando impactos no ato da montagem. Partículas estranhas, mesmo em pequenas quantidades, podem ser prensadas entre elementos rolantes e pistas causando pressões localizadas e indentações que darão início à falha por fadiga. Pequenas quantidades de partículas duras podem reduzir em 20 vezes a vida de um rolamento. Montagem com impactos inapropriados podem deixar marcas nas pistas que também darão início às falhas por fadiga (AFFONSO, 2014).



## 2.9 Fractografia

Segundo Marques (2012), a fractografia é uma ferramenta importante para análise de falhas, pois proporciona informações importantes para análise das falhas, através dos perfis das superfícies de fratura, considerando a microestrutura e os mecanismos de falha. Superfícies de fratura demonstram relações entre componentes estruturais, campos de tensões locais e formações típicas de relevo. No caso das ligas metálicas, a formação de relevo pode indicar as linhas de ação de carga, a dinâmica do processo de fratura, falhas de uso ou de processamento, entre outros. A fractografia relaciona a morfologia de uma superfície de fratura ao processo de fratura e leva em consideração o material, o carregamento, a temperatura, o ambiente, a direção e a taxa de crescimento da trinca, entre outros. A fractografia quantitativa utiliza parâmetros numéricos para caracterizar essas morfologias e uma de suas aplicações é a reconstituição da história da propagação da trinca de fadiga, a partir das superfícies de fratura.

Um fractal é um objeto de forma geométrica que pode ser dividido em partes em que cada uma das divisões se parece com o objeto original, ou seja, um fractal pode ser gerado por meio da repetição de um fragmento padrão. Assim, os fractais podem ter infinitos detalhes preservados pela independência de escala de seu comportamento auto similar (MARQUES (2012), APUD LOPES; BETROUNI, 2009).

Como cada parte dela se parece com a própria, a couve-flor (figura 16) é um bom exemplo de fractal, pois é formada por partes ainda menores que também se assemelham com a parte maior, sendo possível pensar nessa divisão em muitas escalas de tamanho (MARQUES (2012), APUD FANTINATO, 2008).

Figura 16 – Exemplo de fractal natural, couve-flor.



Fonte: MARQUES, 2012, p. 40 APUD FANTINATO, 2008.

Por serem bastante rugosas as superfícies de fratura e também poderem apresentar auto-similaridade independente de escala, o conceito de geometria fractal tornou-se bastante útil para sua análise (MARQUES (2012), APUD RUSS, 1994; HOROVISTIZ, 2000).

Estudos sugerem que o perfil de uma fratura não pode ser analisado como um fractal simples (repetição de um objeto geométrico), mas como um fractal complexo. Segundo autores, ao analisar o perfil de uma fratura em diferentes ampliações, pode-se notar a não repetição do perfil inicial, mas somente a mesma aparência qualitativa (MARQUES (2012), APUD STACH E CYBO (2003)).

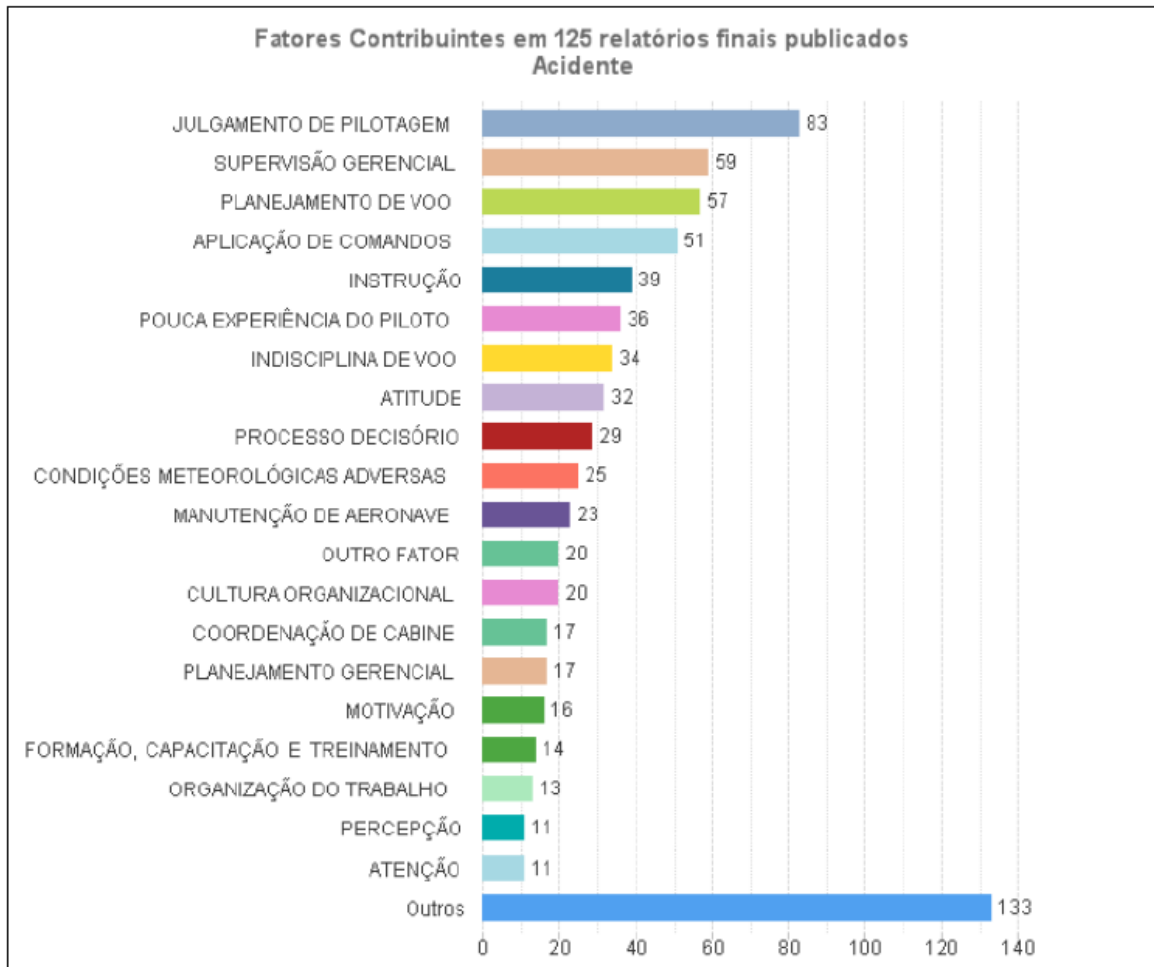
Os perfis da fratura funcionam como fractais mistos, com diferentes propriedades a diferentes escalas de ampliação, ou seja, possuem propriedades multifractais que não podem ser descritas pela repetição de uma forma geométrica (MARQUES (2012), APUD STACH; CYBO, 2003; CAMPOS, 2010).

Trincas possuem superfície em geometria fractal e suas propriedades podem ser analisadas de maneira profunda através dessa geometria (MARQUES (2012), APUD DAUSKARDT; HAUBENSAK; RITCHIE, 1990; MANDELBROT; PASSOJA; PAULLAY, 1984).

## 2.10 Fatores Humanos

Dados estatísticos recentes levantados pela Boeing mostram que 62% dos acidentes aéreos envolvendo aeronaves de grande porte são causados por erro humano (MARQUES, 2004). Estão incluídos neste resultado todos os fatores contribuintes conhecidos: Falha de treinamento, estresse, fadiga, desatenção, imprudência, imperícia, erro de julgamento, falha de planejamento, supervisão deficiente, falta de comunicação.

Figura 17 – Incidência dos fatores contribuintes em acidentes



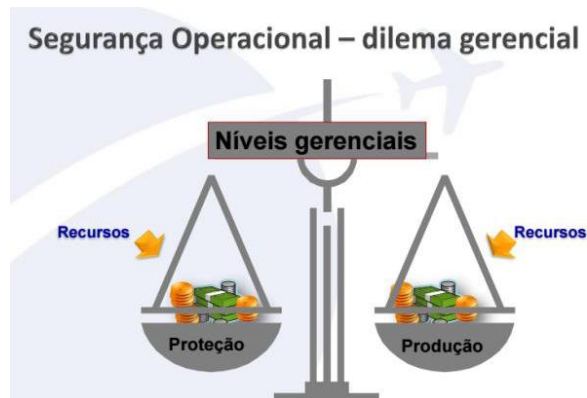
Fonte: MARQUES, 2004.

Helmreich, um dos maiores estudiosos dos Fatores humanos, afirma que, dado que seres humanos operem sistemas complexos, erros ocorrerão e que, sob condições de estresse ou sobrecarga de trabalho, a probabilidade de erro pode ser ainda maior (HELMREICH, 1998).

O desafio é manter o processo sob constante gerenciamento, identificando de forma contínua os riscos e perigos para evitar que o erro humano cause um prejuízo material ou a integridade física dos seres humanos sem prejudicar o faturamento das empresas.

Também é preciso melhorar a conscientização das pessoas sobre seus limites fisiológicos e psicológicos. Não existe organização da aviação civil que tenha sido criada somente para fornecer segurança operacional. Nas figuras 18, 19 e 20, é possível observar o dilema gerencial em relação à produção e a proteção contra acidentes.

Figura 18 – Dilema gerencial I



Fonte: HELMREICH, 1998.

O que se busca é o equilíbrio entre a produção e a proteção, se a produção for mais importante que a proteção, a operação estará em risco de acidente.

Figura 19 - Dilema gerencial II



Fonte: HELMREICH, 1998.

Se a proteção for mais importante que a produção, a empresa terá seu faturamento afetado, podendo até levar a falência.

Figura 20 - Dilema gerencial III



Fonte: HELMREICH, 1998.

Segundo a International Civil Aviation Organization (ICAO, 2003, p.1-1), o elemento humano é a parte mais flexível, adaptável e valiosa dentro do sistema aeronáutico, mas é também a que está mais vulnerável às influências externas que poderão afetar negativamente o seu desempenho.

Como a maior parte dos acidentes e incidentes aéreos resulta de um desempenho humano menor do que o “ótimo” necessário, surgiu uma tendência a atribuí-los meramente ao erro humano. Entretanto, o termo “erro humano” é de pouca ajuda para a prevenção de acidentes e incidentes aéreos. Apesar de ele indicar onde o colapso do sistema ocorreu, ele não oferece respostas precisas sobre como ele ocorreu.

De maneira geral, o conceito de Fator Humano tende a ser identificado como um ramo da Medicina por conta da tradição de estudos iniciais realizados na aviação, que o relacionavam com os efeitos nas pessoas do ruído, do calor, do frio, da vibração e da aceleração. Entretanto, seu alcance e significado são muito mais complexos e amplos (FAA, 2002).

Para Hawkins (1993), a atenção aos Fatores Humanos busca proporcionar os melhores resultados possíveis da relação entre as pessoas e as suas atividades,

através de uma aplicação sistemática das Ciências Humanas, integrada aos conceitos da Engenharia e Sistemas. Seus objetivos são a garantia da eficiência do sistema que inclui a segurança, a eficiência e o bem-estar do indivíduo, tendo como ponto de partida de análise, as interações entre os indivíduos, os grupos e as organizações às quais pertencem, e as interações entre as organizações que constituem o sistema da aviação.

Para a Icao (2003), o conceito de Fator Humano refere-se ao estudo das capacidades e das limitações humanas oferecidas pelo local de trabalho. É o estudo da interação humana em suas situações de trabalho e de vida: entre as pessoas e as máquinas e equipamentos utilizados, os procedimentos escritos e verbais, as regras que devem ser seguidas, as condições ambientais ao seu redor e as interações com as outras pessoas.

Todos esses aspectos podem influenciar no comportamento e no trabalho de maneira a poder afetar a saúde e a segurança.

Dessa maneira, na definição do FAA (2002), o Fator Humano é o estudo do ser humano como parte central de qualquer sistema:

- identificando suas capacidades e limitações para, posteriormente, adaptá-las conforme os demais componentes do sistema;
- quantificando o desempenho humano através de medidas como tempo, unidades de trabalho, segurança, erro, e mudanças necessárias relacionadas a uma situação específica;
- projetando ou modificando os sistemas de acordo com as necessidades identificadas, buscando o melhor desempenho humano possível.

O modelo que será analisado nesse estudo é o modelo de gerenciamento de erros desenvolvido pelo inglês James, que inicialmente concebe a indústria aeronáutica como um sistema de produção complexo, interativo e organizado. Nesse modelo, Reason analisa o modo como os seres humanos contribuem para as falhas desse sistema a ponto de produzir um acidente aeronáutico.

Dessa maneira, para Reason (2000), um acidente é causado por uma série de fatores múltiplos contribuintes, que se formam através de uma cadeia de eventos (falhas latentes em interação com falhas ativas) que rompem as barreiras defensivas (REASON, 2000). As barreiras defensivas seriam então os filtros desenvolvidos pelas organizações com o objetivo de remover, minimizar ou proteger-se de danos operacionais.

Dentro desse enfoque, para se compreender os fatores causais de um acidente dentro da cadeia de eventos deve-se considerar inicialmente o tipo de falha (REASON, 1995; 2000; 2002):

- **FALHAS ATIVAS** – São os atos inseguros de efeito imediato, geralmente cometido por operadores, em contato direto (na “linha de frente”) com o sistema (pilotos, controladores de tráfego aéreo, entre outros). Podem assumir diferentes formas: falha, lapso, perda, engano e violações de conduta.

- **FALHAS LATENTES** – São os elementos patogênicos que residem no sistema. Ficam latentes por muito tempo e demoram a se manifestar, até que se combinam com algum erro ativo que cria a oportunidade de ocorrência de um acidente, dependendo das defesas existentes. Estão ligados a decisões equivocadas ou falhas cometidas por profissionais que não estão necessariamente presentes nem no local nem na hora em que o acidente ocorre (fabricante, decisões gerenciais e manutenção). Essas decisões estratégicas possuem o potencial de introduzir os elementos patogênicos no sistema e, por sua característica latente, podem ser identificadas e remediadas antes da ocorrência de um evento adverso, o que permite uma atitude proativa no gerenciamento do erro. Entretanto, a maioria dos erros latentes só é descoberta quando uma defesa falha por profissionais que não estão necessariamente presentes nem no local nem na hora em que o acidente ocorre (fabricante, decisões gerenciais e manutenção). Reason (2000) escolheu a imagem gráfica do “queijo suíço” (figura abaixo) para explicar seu modelo, inspirado na “teoria dos dominós” desenvolvida por Heinrich, que representaria a trajetória do acidente através das camadas defensivas do sistema.



Figura 21 – Modelo do queijo suíço



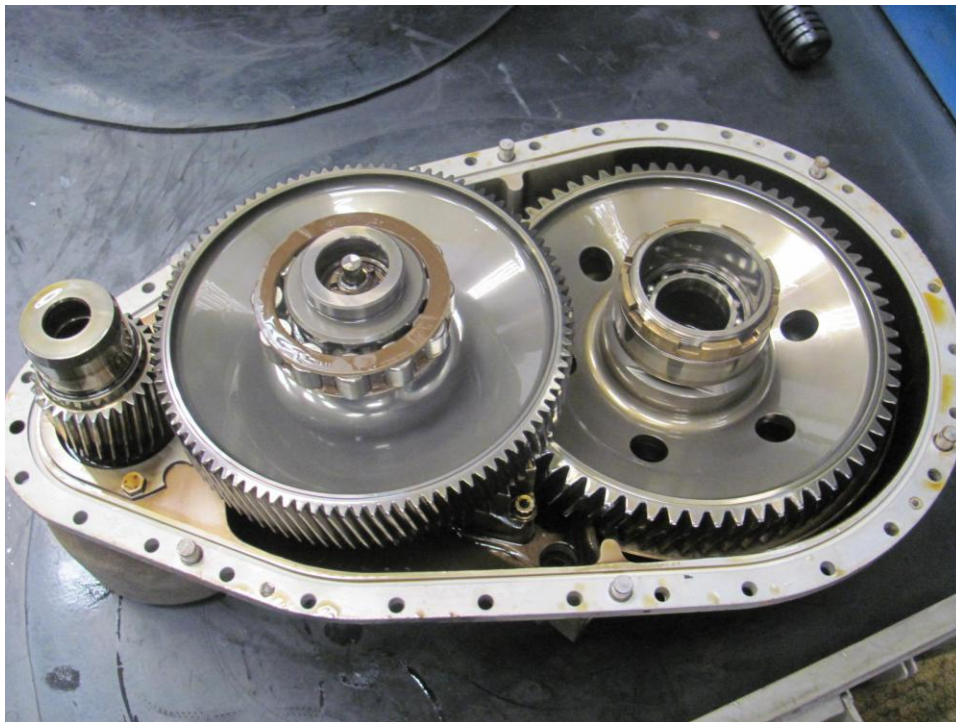
Fonte: Why do interns make prescribing errors? A qualitative study MJA 2008, 188 (2), 89-94

Na imagem do “queijo suíço”, as falhas ativas causam acidentes quando combinadas com rupturas nas camadas de defesa. As falhas latentes são “janelas” nas defesas do sistema que, ao se combinarem com falhas ativas, criam uma trajetória de oportunidades de acidente através de algumas ou de ou de todas as camadas protetoras do sistema. São estas janelas alinhadas nas várias defesas que constituem um evento. Dessa maneira, os caminhos das falhas ativas e latentes se juntam todas as camadas protetoras do sistema. São estas janelas alinhadas nas várias defesas que constituem um evento. Dessa maneira, os caminhos das falhas ativas e latentes se juntam para criar trajetórias completas ou parciais de oportunidades de acidentes (REASON, 2000).

### 3 ESTUDO DE CASO

Neste trabalho se desenvolve estudo de caso a respeito da falha prematura do rolamento fronteiro da engrenagem intermediária da caixa de redução de um motor turbo eixo da empresa TBM do Brasil.

Fotografia 1 – interior da caixa de redução – rolamento danificado encontra-se abaixo da engrenagem intermediária.



Fonte: TBM do Brasil

O estudo de caso começa no momento em que o piloto, em vôo, observa a luz acesa no painel da aeronave indicando partículas magnéticas soltas no interior da caixa de redução e aborta a missão. Inspeções revelaram a presença de partículas no filtro de óleo e nos plugs magnéticos (sensores magnéticos da caixa de redução). O motor foi removido. A análise das partículas encontradas no filtro, e no plug magnético do módulo 1 identificou o material 100C6 que é o material constituinte dos rolamentos das engrenagens da caixa de redução.

A seguir foi verificada falha da pista externa do rolamento da engrenagem intermediária com descascamento. A pista externa do rolamento havia trincado por motivo ainda não identificado, quando se iniciou uma série de análises para então se encontrar as causas da falha. A seguir segue a análise que foi feita de acordo com relatórios do controle da qualidade da empresa.

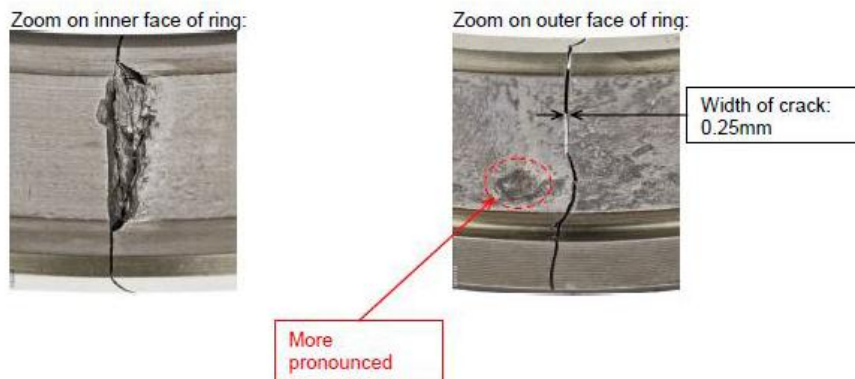
Com ensaio visual nas pistas do rolamento foi detectada trinca passante na área de carga máxima, marcas de roçamento na pista externa em região a  $220^\circ$  centrada da trinca, descascamento na área da trinca na pista de rolagem e marcas significativas ocasionadas pela entrada de partículas.

Fotografia 2 – Anel externo do rolamento danificado.



Fonte: TBM do Brasil

Fotografia 3 – danos no anel externo do rolamento. Descascamento ou lascamento à esquerda e indentação à direita.



Fonte: TBM do Brasil.

Ensaio visual nos rolos detectaram numerosas indentações e arranhões em suas faces de contato com a pista devido à entrada de partículas e marcas mais pronunciadas de um lado do que de outro.

Fotografia 4 – rolos danificados do rolamento fronteiro da engrenagem intermediária da caixa de redução do motor turbo eixo



Fonte: TBM do Brasil

Ensaio visual na gaiola do rolamento detectou desgaste do banho de prata devido ao roçamento das faces dos rolos mais pronunciado de um lado do que de outro além de aparas faltando no lado externo da maioria dos bolsos em linha com os rolos.

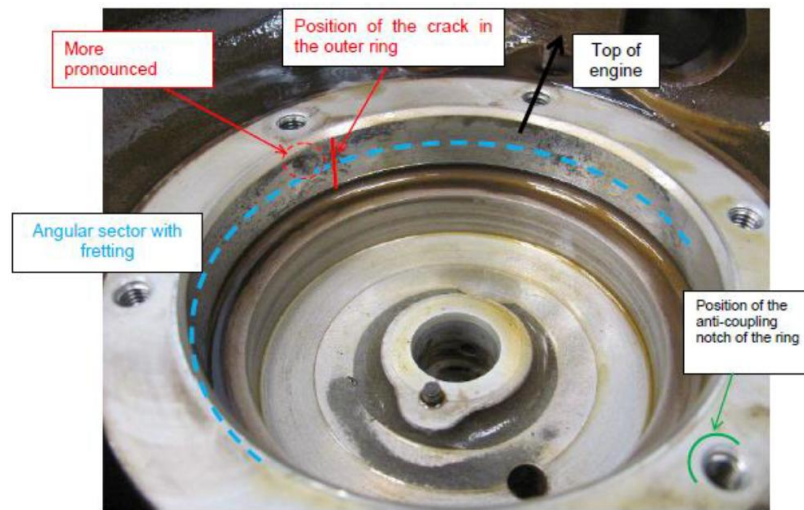
Fotografia 5 – Danos na gaiola (separador) do rolamento danificado.



Fonte: TBM do Brasil.

Através de registro fotográfico efetuado durante a desmontagem é possível observar as áreas de atrito no invólucro correspondentes ao anel externo do rolamento dianteiro da engrenagem intermediária e, em particular, a imagem da marca observada perto da rachadura. Também foi executada análise dimensional neste invólucro e foi constatado 78,031mm de diâmetro para o alojamento para uma dimensão de projeto de 78mm. No entanto, não há indicação se esse desvio dimensional é uma causa ou consequência dos danos.

Fotografia 6 – danos no involucro do rolamento danificado. Face do alojamento do rolamento. Marcas de contato do invólucro com a face externa do rolamento danificado.

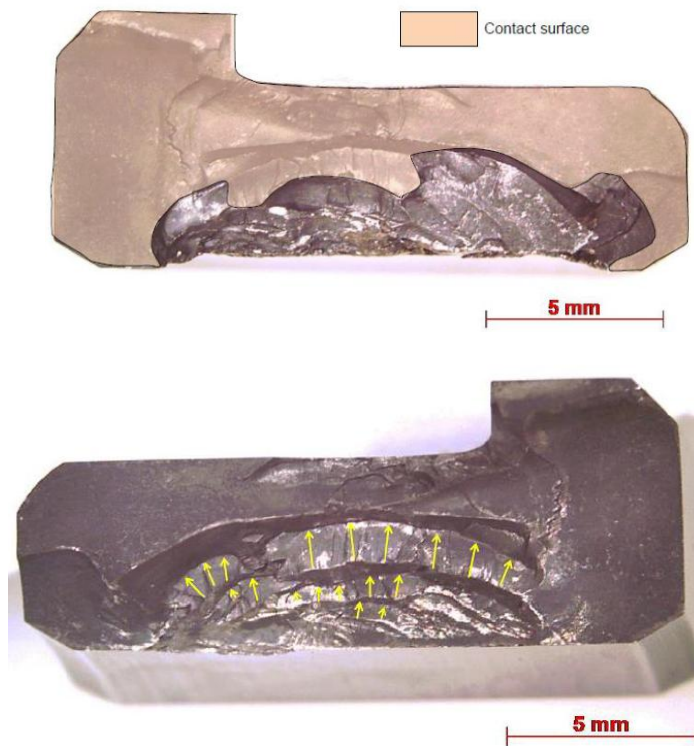
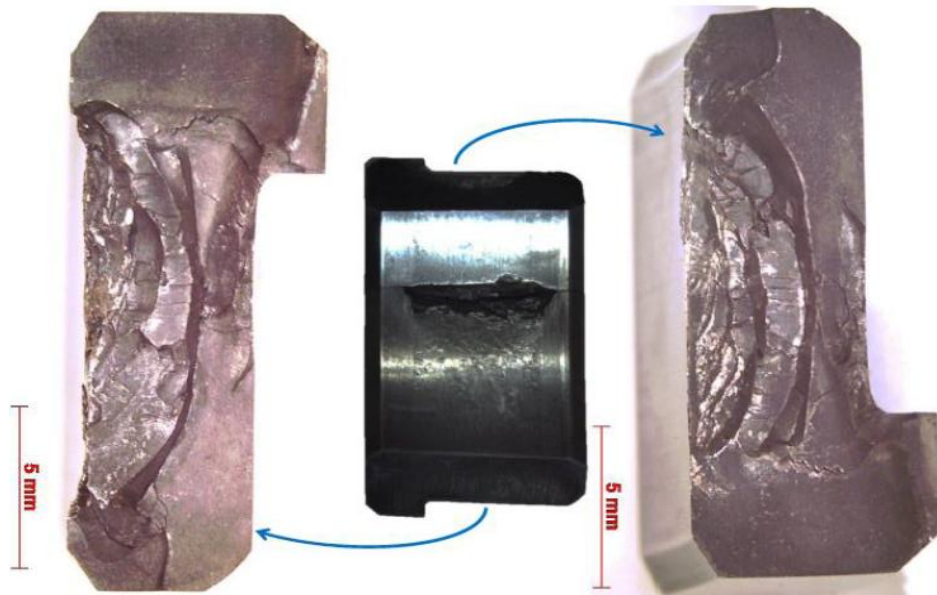


Fonte: TBM do Brasil.

Análise química também foi feita no material e foi confirmado que o material presente na caixa de redução é o mesmo material constituinte dos rolamentos (100C6).

O principal dano do rolamento dianteiro da engrenagem intermediária foi cortado para que a superfície da fratura fosse observada através de fractografia. Quando as duas partes opostas foram analisadas foi observado que não ocorreu contato em toda superfície do material que estava faltando.

Fotografia 7 - corte efetuado no rolamento para análise através de fractografia da superfície da falha do rolamento danificado.



Fonte: TBM do Brasil

A extensão da oxidação e micro impactos nas duas partes significou que o ensaio não é capaz de observar os riscos de fadiga. No entanto, principalmente nas áreas onde os materiais se desprenderam foi observada distribuição crescente em passos do material de base distribuídos em um padrão observável em escala macroscópica, o que pode indicar um fenômeno de fadiga.

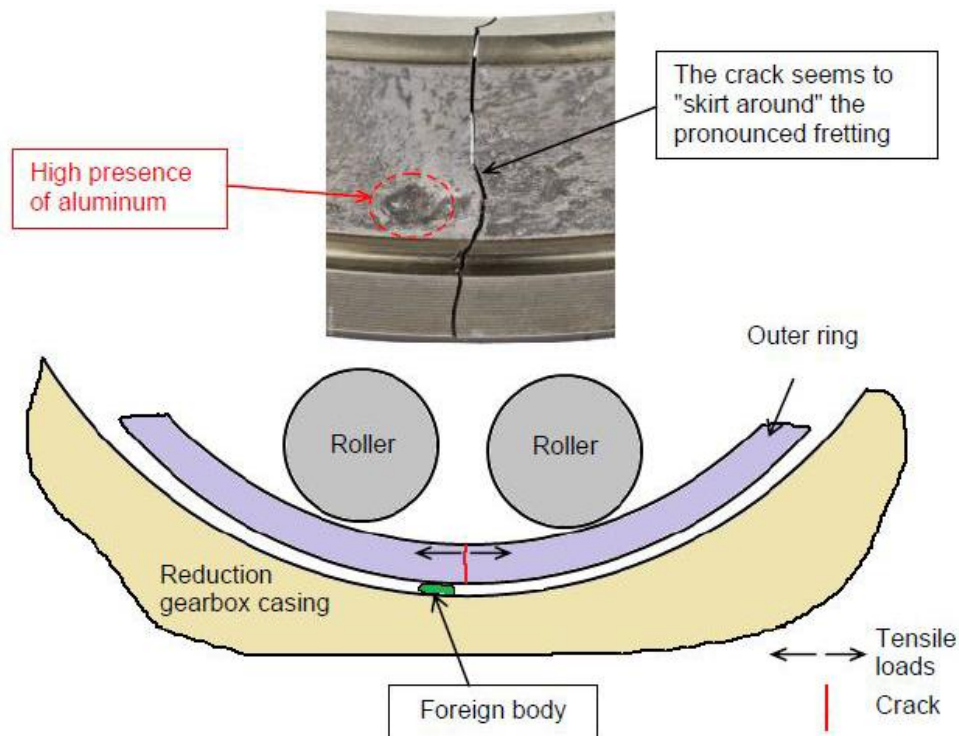
#### **4 RESULTADOS**

Chegou-se à conclusão de que a indicação no painel da aeronave foi causada por danos ao rolamento dianteiro da engrenagem intermediária. Esta falha é estranha ao projeto porque em operação normal, as cargas tangenciais no anel externo do rolamento são baixas. Muito grande, uma carga radial do rolamento pode levar a descamação, mas isso tende a se estender ao longo da pista de rolamento e não através dela.

As hipóteses quanto à causa da falha são as seguintes:

- Um choque que teria iniciado o crateração;
- O deslizamento dos rolos que teria causado cargas tangenciais, mas não há indicação nas pistas de rolamento para confirmar isso.
- O contato incorreto entre o anel externo e a caixa causado, por exemplo, por um corpo estranho, poderia ter gerado cargas incomuns. Uma marca de fricção mais pronunciada é visível na superfície externa do anel e no furo da caixa da caixa de redução (linha pontilhada vermelha). Uma análise da superfície externa do anel revelou alumínio local. A presença deste material pode ser devida à fricção com o invólucro e também devido à presença de um corpo estranho durante a montagem. Uma vez que o anel se separou, a velocidade do rolamento induziu a sobrecarga local criando descamação.

Figura 22 – posição de partícula estranha encontrada entre o anel externo do rolamento danificado e o invólucro.



Fonte: TBM do Brasil

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pode-se concluir, através da indentação mais pronunciada localizada na pista externa do rolamento (observada na figura 22) e logo antes da trinca (considerando a direção da rolagem dos componentes) que a causa da falha prematura do rolamento foi por fadiga de contato ocasionada pela inclusão de partícula entre a face do invólucro e a face externa do rolamento.

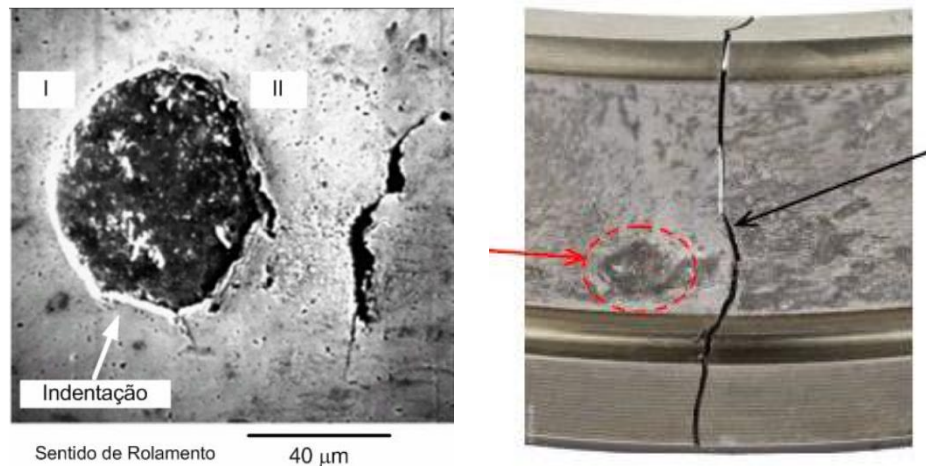
Segundo Norton (2013) uma carga constante externa aplicada a um mancal em rotação cria cargas dinâmicas nos elementos do mancal da mesma maneira que um



momento constante em um eixo em rotação causa tensões dinâmicas, porque qualquer ponto em uma esfera, rolo ou pista vê a carga vir e ir à medida que o mancal roda, proporcionando consistência à conclusão exposta acima.

Essa conclusão também é ratificada considerando a pesquisa, já citada neste trabalho, realizada por DOMMARCO et al. (2006) que introduziram na pista de desgaste propositalmente marcas de ensaio de dureza Brinnell para análise do fenômeno de fadiga de contato.

Figura 23 - Comparação entre a indentação artificial realizada por Dommarco et al (2006) (à esquerda) e a indentação real do estudo de caso deste trabalho (à direita).



Fonte: elaborada pelos autores deste trabalho.

Na pesquisa eles observaram que, com o defeito artificial introduzido, as cargas cíclicas produzem pequeno fluxo de massa na direção de rolagem. Na primeira borda da indentação a deformação plástica é acomodada pela cavidade, mas na segunda borda o mesmo não ocorre resultando em acúmulo de deformação mais severa nucleando a trinca por fadiga de contato. Outra justificativa para a nucleação da trinca é que a região antes da primeira borda está sofrendo esforços compressivos enquanto que a região logo após a segunda borda está sob tensões de tração devido a indentação, o que leva à nucleação da trinca.

Também podemos concluir, segundo autores já citados anteriormente neste trabalho, que para superfícies com presença de defeitos superficiais a nucleação de trincas será favorecida porque mais concentradores de tensão estarão disponíveis para atuação. Por outro lado, em superfícies isentas de defeitos a nucleação de trincas será dificultada.

Conclui-se também que as tensões de cisalhamento máximas provocadas logo abaixo da superfície pela tensão cíclica de compressão, que se dá com a passagem dos rolos pela pista na frequência de rolagem, ocasionaram a nucleação de trinca localizada logo abaixo da superfície, depois da indentação mais expressiva. A trinca evoluiu para crateração e depois para lascamento quando se despreendeu uma quantidade maior de material da superfície.

Após análise dos resultados decorrentes da busca das causas da falha, foi verificado que fatores humanos podem ter sido contribuintes para o evento estudado, pois a inclusão de material estranho pode ter acontecido no momento da montagem por não se ter respeitado o procedimento que exige limpeza e cuidado extremo com a inclusão de partículas por meio da presença de sujeira. Fatores humanos tem sido objeto de uma enorme concentração de estudos com grande influência sobre a segurança operacional no meio aeronáutico.

O rolamento é considerado um dos componentes mecânicos mais importantes para as máquinas e equipamentos, sendo que sua falha pode ocasionar uma ausência parcial ou total da função exercida pelo equipamento causando grandes prejuízos, principalmente em processos de produção contínuos. Muitas vezes a simples troca do rolamento, seja por uma manutenção corretiva ou por análise preditiva, sem um estudo da causa raiz da falha, não resolve o problema e o rolamento novo instalado pode falhar pela mesma causa. Diante disso, este estudo visa apresentar a falha ocorrida no rolamento, suas causas e respectivas contramedidas.

A montagem é um dos estágios críticos do ciclo de vida do rolamento. Se o rolamento não é montado adequadamente com o método e as ferramentas corretas, a sua vida útil é reduzida. Aproximadamente 20% de todas as falhas prematuras em rolamentos é resultado da má colocação ou utilização de técnicas de montagem incorretas. Em algum ponto, o rolamento atingirá o final de sua vida útil e terá de ser

substituído. Embora o rolamento não vá ser utilizado novamente, é extremamente importante desmontá-lo corretamente para que a vida útil do rolamento substituto não seja comprometida. Primeiramente, o uso de métodos e ferramentas de desmontagem corretos ajuda a prevenir danos a outros componentes da máquina, como o eixo e o mancal, que frequentemente são reutilizados. Em segundo lugar, técnicas de desmontagem incorretas podem ser perigosas para o operador.

Para propiciar um desempenho adequado do rolamento e evitar falhas prematuras, são necessárias habilidade e limpeza ao montar rolamentos de esferas e de rolos. Como componentes de precisão, os rolamentos devem ser manuseados com cuidado ao serem montados. Também é importante escolher o método certo de montagem e usar a ferramenta certa para o trabalho.

Conforme já citado anteriormente, o desafio é manter os processos sob constante gerenciamento e através da implementação de políticas de melhoria contínua, identificar de forma também contínua os riscos e perigos para evitar que erros humanos causem prejuízo humano, ambiental ou econômico.

Como fatores contribuintes para que erros humanos sejam cometidos já foram citados, entre outros, falhas de treinamento, estresse, fadiga, desatenção, imprudência, imperícia, erro de julgamento, falha de planejamento, supervisão deficiente, falta de comunicação. Fatores esses que, se combinados, aumentam ainda mais a probabilidade de resultar em erro, precisam de acompanhamento e gerenciamento contínuo por parte das organizações.

Podemos definir como fatores humanos, as capacidades e limitações humanas de lidar com o ambiente ao seu redor e este ambiente pode ser o ambiente de trabalho, sendo o estudo da interação humana em suas situações de trabalho e de vida: interação de pessoas entre pessoas, pessoas entre máquinas e equipamentos utilizados, procedimentos sejam escritos ou verbais, regras a serem cumpridas, ou seja, com todo ambiente ao seu redor.

Por isso é importante identificar as capacidades e limitações de pessoal para, posteriormente, adaptá-las conforme os demais componentes do sistema, quantificando o desempenho através de medidas como tempo, unidades de trabalho, segurança, erro, e mudanças necessárias relacionadas a uma situação específica, projetando ou

modificando os sistemas de acordo com as necessidades identificadas, buscando o melhor desempenho humano possível. Assim torna-se possível melhorar a conscientização das pessoas sobre seus limites fisiológicos e psicológicos.

Portanto, deve ser incluído treinamento periódico para o pessoal responsável pela montagem de tais componentes com constante acompanhamento para verificação da eficácia dos procedimentos e sistemas da empresa a que estão submetidos. Também devem ser verificadas continuamente condições do ambiente de trabalho, levando em consideração sempre a organização, segurança e saúde dos colaboradores bem como a conservação do meio ambiente.

Dando atenção aos fatores humanos é possível proporcionar os melhores resultados possíveis da relação entre as pessoas e as suas atividades, aplicando sistematicamente as Ciências Humanas integrando-as aos conceitos da Engenharia. Como resultado as organizações terão a garantia da eficiência do sistema que inclui a segurança, a eficiência e o bem-estar do indivíduo, tendo como ponto de partida de análise, as interações entre os indivíduos, os grupos e as organizações às quais pertencem, e as interações entre as organizações que constituem seus sistemas organizacionais.

### **5.1 Resumo das causas da falha**

- Fadiga superficial causada por concentrador de tensão (indentação mais pronunciada) no lado externo da pista de rolagem ocasionado pela inclusão de partícula entre a face do invólucro e a face externa do rolamento;
- Fatores humanos podem ter sido contribuintes para a falha, pois a inclusão de material estranho pode ter acontecido no momento da montagem por não se ter respeitado o procedimento que exige limpeza e cuidado extremo com a inclusão de partículas por meio da presença de sujeira.

## 5.2 Resumo das recomendações

As recomendações baseiam-se na implementação de políticas de melhoria contínua, conforme seguem:

- Treinamento periódico para o pessoal responsável pela montagem de tais componentes que são considerados críticos ao funcionamento dos equipamentos;
- Constante acompanhamento para verificação da eficácia dos procedimentos e dos sistemas da empresa aos quais os responsáveis pela montagem dos rolamentos estão submetidos;
- Verificação contínua das condições do ambiente de trabalho;
- Dar atenção aos fatores de comportamento humano.

## REFERÊNCIAS

[1] NTN do Brasil. **Classificação e Características dos Rolamentos**. Disponível em: < <http://www.ntn.com.br/pdfServicos/indiceA2/indiceA2.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2016.

[2] NKS Brasil. **Introdução aos Rolamentos**. Disponível em: <<http://nsk.com.br/Artigo.asp?Aid=60>>. Acesso em: 27 mai. 2016.

[3] Norton, R.L.: **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. 4a edição. Porto Alegre: Bookman, 2013.

[4] ARRIEL. **Training Notes. 1st Line Maintenance course**. Edition 1<sup>st</sup>. April 2012.

[5] BUDYNAS, Richard G; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

[6] MENNA, Alexandre R. **Detecção de falhas em mancais de rolamento por análise de vibrações em banda larga: Um caso prático de aplicação em uma população de equipamentos rotativos**. 2007. 167 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

[7] PELLICCIONE, André Da S; MORAES, Milton F; GALVÃO, Jorge Luiz R; MELLO, Luis Antonio De; SILVA, ÉDISON, S Da. **Análise De Falhas Em Equipamentos De Processo: Mecanismos De Danos E Casos Práticos**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2012.

[8] AFFONSO, Luiz Otávio Amaral. **Equipamentos Mecânicos: Análise De Falhas E Solução De Problemas**. 3 Ed. Rio e Janeiro: Qualitymark, 2014.

[9] VANEGAS M, Nelson; ÁLVAREZ R, John; SOUZA, Gilberto F M. **Teoria Da Confiabilidade Aplicada Na Avaliação Da Vida Em Fadiga-De-Contato**. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 17 N° 3, 2009, pp. 423-431. Disponível em: [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052009000300016&script=sci\\_arttext&lng=en](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052009000300016&script=sci_arttext&lng=en). Acesso em: 26 ago. 2017.

[10] BRUNETTI, Cristiano. **Efeito Da Preparação De Corpos De Prova Na Vida Em Fadiga De Contato De Rolamento De Ferro Fundido Nodular Austemperado**. 2008. 116 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

[11] MARQUES, Thaís Peres Zanetine. **Fractografia Quantitativa De Superfícies Obtidas Em Ensaios De Propagação De Trincas Por Fadiga Em Aço Inoxidável 15-5ph**. 2012. 97 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade De Engenharia De Guaratingueta, 2012, Guaratingueta, 2012.

[12] FEDERAL AVIATION ASSOCIATION (FAA). **FAA Research 1989-2002/Human Factors in Aviation Maintenance and Inspection/Human Factors Guide for Aviation Maintenance**. Publicação do Human Factors on Aviation Maintenance and Inspection (HFAMI) web site. 2002. Disponível em: <<http://hfskyway.faa.gov/HFAMI/lpext.dll/FAA%20Research%201989%20-%202002/Infobase/1a4?fn=main-j-hfami.htm&f=templates>> Acesso em: janeiro de 2017.

[13] MARQUES, E. **Fator humano**. In: INSTITUTO DE FOMENTO E COORDENAÇÃO INDUSTRIAL (IFI). Seminário Internacional de Fator Humano. 6 e 7 de outubro, 2004, CTA: São José dos Campos.

[14] HAWKINS, F. H. **Human factors in flight**. Aldershot : Ashgate, 1993.

[15] HELMREICH, R.L. **Error management as organizational strategy**. In: Proceedings of the IATA Human Factors Seminar. Bangkok, Thailand, April 20-22, p. 1-7, 1998.

[16] Reason JT. **Human Error**. Cambridge: Cambridge University Press; 1990.



## APÊNDICE A



Operator Support Department

TECHNICAL REPORT Ref: T16-BR10451E-1.- REV01

SECTION 1: EQUIPMENT DESCRIPTION								
Date	Warranty request	Warranty request file reference						
April 04, 2016	Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>	SG15.06879						
Operator	Owner	Date of arrival	Initial reason for removal (customer reason)					
XXX	XXX	March 15, 2016	METAL PARTICLES ON ALL MAGNETIC PLUGS					
Occurrence	RA (Accident Report)	RI (Incident report)						
	Yes <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>	Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>						
Accident /Incident reference								
301266428								
Family Type Variant Engine version of the equipment removed	Serial Number	Total Hours	Work Order ref					
ARRIEL 1 D1	9344	4731.90	10451					
SECTION 2: WORK TO BE CARRIED OUT								
P/N	Eng/Mod / Acc/ ULP / LLP	S/N	Work to be carried out	Entity Maintenance Center / Repair Center	Total hours	Total cycles NG / PT	TSO	CSO NG / PT
0292005220	Engine	9344	Repair	Repair Center	4731.90	9902.25 / 9154.90	1519.90	3642.25 / 9154.90
0164850560	F.C.U. ASSY, ADJUSTED	782M	Overhaul	Repair Center	5696.48	-	-	-
9603490601	BEARING	-	To reject	Repair Center	-	-	-	-
9608650901	BEARING	3077SN	To reject	Repair Center	4731.90	-	-	-
9560157860	FREE WHEEL	4528	To reject	Repair Center	2129.90	-	-	-
70BM015420	Module 01	9565	Repair	Repair Center	6560.30	- / -	-	- / -
70BM025020	Module 02	3666	Repair	Repair Center	3881.00	4747.20 / -	-	- / -
70BM035420	Module 03	9860	Repair	Repair Center	3881.00	4747.65 / -	909.00	1608.65 / -
0292252930	IMPELLER, CENTRIFUGAL	841OTT	To repair	Repair Center	3881.00	4747.65	-	-
9609000562	BEARING	3699	To reject	Repair Center	909.00	-	-	-
229225A1L0	BLADE 1ST STAGE	72788	To reject	Repair Center	909.00	1608.65	-	-
229225A1L0	BLADE 1ST STAGE	72799	To reject	Repair Center	909.00	1608.65	-	-
229225A1L0	BLADE 1ST STAGE	72782	To reject	Repair Center	909.00	1608.65	-	-
229225A1L0	BLADE 1ST	72809	To reject	Repair	909.00	1608.65	-	-
WRITTEN BY				APPROVED BY				
Nelson Nicodemas				Julio Gomes				

## APÉNDICE B



Operator Support Department

TECHNICAL REPORT Ref: T16-BR10451E-1

Description (Engine / Module / Accessory / Part)	Family Type Variant Engine Version	Serial Number	Total Hours	Work Order Ref
Engine	ARRIEL 1 D1	9344	4731.90	10451

### SECTION 9: FINDINGS PER MODULE (OR PER SUB-COMPONENT)

#### SECTION 9.1: FINDINGS UPON REMOVAL

Flaking on separator cage and crack on bearing race of outer ring.



#### SECTION 9.2: FINDINGS UPON ASSESSMENT

Family Type Variant Engine Version / Module P/N	Serial Number	Total Hours
ARRIEL 1 D1 - 00 / 0292005220	9344	4731.90

## APÊNDICE C



Operator Support Department

TECHNICAL REPORT Ref: T16-BR10451E-1

Description (Engine / Module / Accessory / Part)	Family Type Variant Engine Version	Serial Number	Total Hours	Wibrik Order Ref
Engine	ARRIEL 1 D1	9344	4731.90	10451

Item	P/N upon arrival	Description	P/N offered for installation (or equivalent) (if different from received P/N)
72151001310	9609000247	BEARING	9609000394
Decision	TO REJECT DUE TO PRINCIPAL - DAMAGE		
Reference TU / SB	-	Part removed for modification applications	Yes <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Part removed because of reason for removal	Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		
Damage location	-		
Comments	Part rejected - Send to investigation		

Item	P/N upon arrival	Description	P/N offered for installation (or equivalent) (if different from received P/N)
72151001315	9609000247	BEARING	9609000394
Decision	TO REJECT DUE TO PRINCIPAL - DAMAGE		
Reference TU / SB	-	Part removed for modification applications	Yes <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Part removed because of reason for removal	Yes <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		
Damage location	BEARING RACE OF OUTER RING - CRACKED SEPARATOR CAGE - FLAKING		
Comments	Flaking on the separator cage and cracked on the bearing race of outer ring.		

