



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS
CAMPUS MANAUS CENTRO
DEPARTAMENTO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JAILSON PEREIRA DE JESUS

FALHA POR FADIGA EM COMPONENTES MECÂNICOS:
UM ESTUDO DE CASO

MANAUS - AM

2022

JAILSON PEREIRA DE JESUS

**FALHA POR FADIGA EM COMPONENTES MECÂNICOS:
UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do Campus Manaus Centro do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Esp. Plácido Ferreira Lima.

MANAUS-AM

2022

Biblioteca do IFAM- Campus Manaus Centro

J58f Jesus, Jailson Pereira de.
Falha por fadiga em componentes mecânicos: um estudo de caso / Jailson Pereira de Jesus. – Manaus, 2022.
52 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus Centro, 2022.

Orientador: Prof. Esp. Plácido Ferreira de Lima.

1. Engenharia mecânica. 2. Engenharia de materiais. 3. Componentes mecânicos. I. Lima, Plácido Ferreira de. (Orient.). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas III. Título.

CDD 621

JAILSON PEREIRA DE JESUS

**FALHA POR FADIGA EM COMPONENTES MECÂNICOS:
UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do Campus Manaus Centro do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Esp. Plácido Ferreira

Aprovado em 18 de julho de 2022
(ATA 143 de 18/07/2022)

BANCA EXAMINADORA

(Assinado digitalmente em 19/08/2022 17:09)

FERNANDO ANTONIO ALVES DOS SANTOS JUNIOR

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

Matrícula: 1020023

(Assinado digitalmente em 18/07/2022 16:26)

CRISTOVAO AMERICO FERREIRA DE CASTRO

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

Matrícula: 1037557

(Assinado digitalmente em 18/07/2022 16:27)

PLACIDO FERREIRA LIMA

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

Matrícula: 981395

Aos meus pais Jurandir Pereira de Jesus
(*in memoriam*) e Emília Conceição de
Jesus por desde sempre me mostrarem o
caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado o dom de vida e sempre ter me guiado.

A meus irmãos, e toda a minha família, principalmente a minha esposa e companheira Elane Cirnes de Souza e a minha filha Larissa Cirnes de Jesus, pelo companheirismo e entendimento de minhas ausências durante essa jornada.

Ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) pela oportunidade de graduação e por sua conjuntura de ensinar e formar profissionais com maestria.

A todos os Professores do corpo docente do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do IFAM, por todo o aprendizado por mim adquirido, especialmente o Prof. Msc. Carlos José Baptista Machado (*in memoriam*) por suas aulas agregadoras de conhecimento e motivação.

Ao Professor da disciplina de TCC Prof. Dr. Ailton Gonçalves Reis, não só pela condução brilhante da disciplina, mas também pelo estímulo e incentivo dado em todos os momentos

A Meu Orientador Prof. Esp. Plácido Ferreira Lima, agradeço por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa, e pelo dedicado envolvimento em todas as etapas do processo.

A todos os colegas de classe que já concluíram ou que ainda permanecem nessa longa caminhada.

E a todos os outros que não foram citados, mas que contribuíram de uma forma ou de outra para que este objetivo fosse atingido.

“A falha não é uma opção.”

(Jose Braidotti Junior).

RESUMO

Este estudo objetivou analisar o estudo da aplicação da Engenharia dos Materiais como meio de obter conhecimento para solucionar anomalias decorrentes de falhas por fadiga mecânica em componentes mecânicos. Para tanto, foi utilizado como método para coleta de dados a pesquisa bibliográfica, explicativa, e de natureza aplicada, além de um estudo de caso de um acidente aeronáutico com uma aeronave helicóptero EC225 na Noruega *devido* a um colapso em um componente mecânico metálico e rotativo ocasionado por fadiga mecânica. A partir do estudo de falhas por fadiga mecânica foi possível perceber a importância do estudo dos mecanismos das falhas, assim como as técnicas de ensaio e os métodos de prevenção e controle de falhas. Enfim, por meio de todo o estudo realizado foi possível confirmar que o engenheiro deve buscar soluções utilizando os conhecimentos adquiridos nas diversas áreas de conhecimento da engenharia mecânica.

Palavras chaves: Engenharia de materiais. Metais. Fadiga mecânica. Acidente aeronáutico.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the study of the application of Materials Engineering as a means of obtaining knowledge to solve anomalies resulting from failures due to mechanical fatigue in mechanical components. To this end, a bibliographic, explanatory and applied research was used as a method for data collection, as well as a case study of an aeronautical accident with an EC225 helicopter aircraft in Norway due to a collapse in a metallic and rotating mechanical component. caused by mechanical fatigue. From the study of failures due to mechanical fatigue, it was possible to perceive the importance of studying failure mechanisms, as well as testing techniques and failure prevention and control methods. Finally, through the entire study, it was possible to confirm that the engineer must seek solutions using the knowledge acquired in the various areas of knowledge of mechanical engineering.

Keywords: Materials engineering. metals. Mechanical fatigue. Aeronautical accident.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - O inter-relacionamento das disciplinas.	15
Figura 2: Aeronave EC225 da CHC antes do acidente.	22
Figura 3: Evolução da trinca.	23
Figura 4 - Fluxo de informação para estimativa de vida.	25
Figura 5 - Curva S-N.	26
Figura 6 - Cockpit do EC225.	36
Figura 7 - Sistema de Monitoramento M'ARMS.	37
Figura 8 - EC225 (H225M) do GTE.	38
Figura 9 - EC225 (H225M) do 4º BAvEX.	39
Figura 10 - Redução de velocidade na CTP.	40
Figura 11 - Vista detalhada da CTP.	41
Figura 12 - Vista detalhada da CTP.	41
Figura 13 - Engrenagens planetárias de segundo estágio da CTP do EC225.	42
Figura 14 - Engrenagens da segunda planetária da aeronave acidentada.	42
Figura 15 - Região da fratura.	43
Figura 16 - Superfície da fratura.	43
Figura 17 - Superfície após limpeza.	44
Figura 18 - Divisão da superfície em zonas.	44

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
2. REFERENCIALTEÓRICO.....	15
2.1 ENGENHARIA DE MATERIAIS.....	15
2.2 MATERIAIS DE ENGENHARIA.....	15
2.2.1 Cerâmicos.....	16
2.2.2 Polímeros.....	16
2.2.3 Compósitos.....	17
2.2.4 Avançados.....	17
2.2.5 Metais.....	18
2.3 FALHAS EM METAIS.....	18
2.3.1 Fratura.....	19
2.3.2 Fluência.....	19
2.3.3 Fadiga.....	20
2.4 FASES DA FADIGA MECÂNICA.....	23
2.4.1 Primeira fase (Nucleação).....	24
2.4.2 Segunda fase (Propagação).....	24
2.4.3 Terceira fase (Ruptura).....	24
2.5 ENSAIOS DE FADIGA MECÂNICA.....	24
2.6 TENSÕES LIMITE DE FADIGA.....	26
2.7 MODIFICADORES DA TENSÃO LIMITE DE FADIGA.....	27
2.7.1 Fator de Superfície (Ka).....	27
2.7.2 Fator de Tamanho (Kb).....	27
2.7.3 Fator de Confiabilidade (Kc).....	27
2.7.4 Fator de Temperatura (Kd).....	28
2.7.5 Fator de Carregamento (Ke).....	28
2.7.6 Fator de efeitos diversos (Kf).....	28
2.8 PROJETOS PARA FADIGA.....	29

2.8.1 Projeto para vida infinita.....	29
2.8.2 Projeto de vida finita.....	29
2.8.3 Projeto sujeito à falha em segurança (Fail Safe)	30
3. METODOLOGIA.....	31
3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	33
4. APRESENTAÇÃO E DISCURSÃO DOS RESULTADOS.....	35
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
REFERÊNCIAS.....	49

INTRODUÇÃO

Os engenheiros convivem comumente, seja no processamento, na manufatura ou na construção de componentes. Sendo assim o estudo da engenharia dos materiais se faz tão necessário tendo em vista que é primordial para um engenheiro ter conhecimento da estrutura e das propriedades desses materiais.

A falha por fadiga tem sido uma das principais causas de falhas de componentes mecânicos e está relacionado diretamente com os materiais metálicos, sendo a determinação do limite vida de componentes submetidos à fadiga é uma etapa essencial no dimensionamento de projetos (*ENSUS ADVANCED ENGINNERING*, 2016). É também uma forma de falha que só ocorre em estruturas sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes, como, componentes de máquinas, estrutura de pontes e aeronaves.

Sendo assim, para exemplificar o assunto de estudo, foi utilizado um estudo de caso de um acidente aeronáutico ocorrido com uma aeronave tipo helicóptero EC225 na Noruega, o qual veio a *chash*¹ devido a um colapso em um componente mecânico metálico e rotativo ocasionado por fadiga mecânica.

Com isso, buscou-se reunir dados e informações com o propósito de responder ao seguinte problema de pesquisa: de que forma o Engenheiro ou Projetista deverá proceder para evitar ou mitigar os possíveis danos causados por falhas por fadiga mecânica em componentes metálicos?

Entendemos que a necessidade de evitar falhas em componentes mecânicos vitais pode ser resolvida com o estudo aprofundado dos mecanismos das falhas, as técnicas de ensaio e os métodos pelos quais as falhas podem ser prevenidas ou controladas.

Diante disso, o objetivo principal deste trabalho é mostrar de que forma a aplicação da Engenharia dos Materiais pode evitar ou mitigar as possíveis anomalias decorrentes der falhas por fadiga mecânica em componentes mecânicos. A partir de uma averiguação mais criteriosa e detalhada podemos desdobrá-los em objetivos mais específicos, sendo eles:

- ✓ Aprofundar o estudo do fenômeno da fadiga mecânica;
- ✓ Apontar as fases da fadiga mecânica;

¹ Termo utilizado na comunidade aeronáutica para designar queda de aeronave

- ✓ Descrever os tipos de ensaios de fadiga mecânica;
- ✓ Indicar a fadiga como fator contribuinte num acidente aeronáutico;
- ✓ Apresentar as soluções determinadas pelos órgãos responsáveis.

No ano de 2008 o Governo Federal Brasileiro em convênio com o Governo da França adquiriu através do projeto H-XBR 50 aeronaves tipo helicóptero da fabricante AIRBUS, essas aeronaves são idênticas à aeronave acidentada que é objeto de estudo desse trabalho. Esse projeto garante até hoje um grande fomento estratégico para o setor industrial nacional, tendo em vista que está incluso não só transferência de tecnologia, mas também a criação de uma planta industrial para proporcionar a produção desse modelo de helicóptero no Brasil.

Sendo assim, com a finalidade de entendermos o fenômeno, conhecer a real causa dos problemas acontecidos, as medidas mitigadoras e efetuar uma análise nas medidas de controle que foram implantadas se justifica a elaboração desse trabalho por se tratar de assunto de alta relevância para indústria nacional.

Concomitante a isso também se mostra de extrema importância à comunidade acadêmica, já que o estudante de engenharia deve conhecer bem seu material e suas propriedades mecânicas, à vista disso conseguirá projetar estruturas, máquinas ou equipamentos mais seguros, contribuindo para efetivação de processos mais homogêneos visando uma diminuição de custos.

Como forma de verificar e compreender detalhadamente o assunto estudado, este trabalho teve a metodologia classificada quanto a objetivos como pesquisa explicativa, já quanto à natureza foi considerada aplicada, pois visa gerar conhecimentos para uma interpretação prática do problema mencionado.

Quanto à forma de abordagem do problema, utilizou-se de pesquisa qualitativa com estudo de caso, sendo que durante a pesquisa também foram consultados principalmente os documentos ostensivos relativos ao acidente aeronáutico, o que a torna também uma pesquisa documental. Por último foi realizada uma pesquisa observação participante com intuito de apreciar as soluções propostas pelos órgãos investigadores e pelo fabricante da aeronave.

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) se propõe a discorrer acerca dos fundamentos da engenharia de materiais não só em sua amplitude para obter um conjunto predeterminado de propriedades necessárias. Mas também delimitando e detalhando o estudo do fenômeno da fadiga mecânica.

Sendo assim possui seu conteúdo formatado em cinco capítulos distintos: O Capítulo 1 é a própria Introdução, na qual são apresentadas as principais

características da pesquisa, apresentar o problema de pesquisa, mostrar seus objetivos e definir os motivos do estudo e de como ela foi pensada.

O Capítulo 2 traz um referencial teórico que traz textos estruturados publicados até o momento versando sobre o tema e sobre o problema de pesquisa. Cabe ressaltar que neste mesmo capítulo não são encontradas somente as referências do tema, mas também o referencial completo das delimitações da pesquisa.

O Capítulo 3 remete a metodologia e seus procedimentos metodológicos, o qual é uma descrição detalhada do caminho a ser percorrido para executar seu processo de pesquisa do trabalho.

No Capítulo 4 e a Apresentação e Discussão dos Resultados onde se faz o confronto de ideias, não somente na seção de referências, mas também na própria análise do estudo, culminando com isso no Capítulo 5, no qual são relatadas as considerações finais e a perspectivas em relação ao conteúdo do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo faremos uma compilação bibliográfica com o objetivo apresentar os referenciais teóricos que e o estudo do alicerce conceitual que aborda a ideia de autores renomados de dentro da área estudada. Sendo assim darão suporte às discussões apresentadas, pois visa embasar e validar os resultados encontrados.

2.1 ENGENHARIA DE MATERIAIS

O estudo da engenharia dos materiais se faz necessário tendo em vista que e primordial para um engenheiro ter conhecimento da estrutura e das propriedades desses materiais.

Para Callister e Rethwisch (2016, p. 2) a engenharia de Materiais está relacionada “com base nas correlações estrutura-propriedade, projeta [...] a estrutura de um material para obter nele um conjunto predeterminado de propriedades”. O que difere da Ciência dos Materiais que “envolve a investigação das relações entre as estruturas e as propriedades dos materiais”. (CALLISTER; RETHWISCH, 2016, p. 2).

2.2 MATERIAIS DE ENGENHARIA

Os materiais estão incrementados no nosso cotidiano, a evolução da humanidade se deveu exatamente pelo avanço e pela evolução de materiais que cumprisse objetivos cada vez mais específicos. A disponibilidade de materiais está ligada diretamente ao avanço de tecnologias cada vez mais modernas, nos contemplando com materiais cada vez mais sofisticados. (SMITH; HASHEMI, 2010)

Sendo assim os materiais tem seus componentes sempre inter-relacionados com os princípios de processamento, estrutura, propriedades e desempenho. (ASKELAND; WRIGHT, 2014). A Figura 1 mostra esse inter-relacionamento.

Figura 1 - O inter-relacionamento das disciplinas.



Fonte: Callister e Rethwisch (2016).

Ainda constante a Callister e Rethwisch (2016, p. 4) “Os materiais sólidos foram agrupados convenientemente em três categorias básicas: metais, cerâmicas e polímeros”.

Somando-se aos metais, cerâmicas e polímeros existem os compósitos que e a união entre eles, e também os materiais avançados de alta tecnologia, como os biomateriais, semicondutores e os de nanoengenharia. (SMITH; HASHEMI, 2010).

Além disso, cabe ressaltar que os materiais também estão sempre inter-relacionados com os princípios de processamento, estrutura, propriedades e desempenho. (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

2.2.1 Cerâmicos

Os materiais cerâmicos são compostos por elementos classificados entre os materiais metálicos e os materiais não metálicos, a maioria dos quais possui ligações iônicas. Óxidos, nitretos e carbonetos. Segundo Callister e Rethwisch (2016, p. 8) “os materiais cerâmicos são relativamente rígidos e resistentes — os valores de rigidez e de resistência são comparáveis aos dos metais.”

Os cerâmicos são largamente utilizados, principalmente por serem materiais isolantes térmicos e elétricos, isso devido a natureza de suas ligações químicas. Exemplos de aplicação estão em todas as partes, seja na indústria de construção civil com a fabricação de pisos, azulejos, tijolos, lajes, e porcelanatos, telhas e vidros; seja na área do setor automotivo, biomedicina, eletrônicos, dentre outros, e até mesmo no setor aeroespacial. Smith e Hashemi (2010) completa isso afirmando que os materiais cerâmicos são largamente aplicados no revestimento dos ônibus espacial, para que este suporte as altas temperaturas na reentrada na atmosfera terrestre.

2.2.2 Polímeros

Os materiais Polímeros são macromoléculas produzidas a partir da junção de diversas moléculas menores, conhecidas por monômeros. Esses monômeros são moléculas de baixa massa molecular os quais, a partir das reações se unem por meio de ligações covalentes em uma reação química conhecida como polimerização. (SMITH; HASHEMI, 2010).

Para Smith e Hashemi (2010) os polímeros tem também muita variância na sua resistência e ductilidade, sendo predominantemente materiais maus condutores elétricos.

Segundo Callister e Rethwisch (2016) confirma o exposto por Smith e Hashemi (2010), afirmando que dentre os polímeros estão inclusos os materiais plásticos e também os materiais de borracha, e além disso “muitos deles são compostos orgânicos que têm sua química baseada no carbono, no hidrogênio e em outros elementos não metálicos”. (CALLISTER; RETHWISCH, 2016, p. 9).

2.2.3 Compósitos

Um material compósito é considerado como sendo uma ligação macroscópica de dois ou mais materiais diferentes com o objetivo de formar um terceiro material que possam possuir propriedades específicas dos materiais utilizados já estudados (metais, cerâmicas e polímeros), mas que não se encontram em nenhum de maneira individualizada. (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

Os autores Callister e Rethwisch (2016) completam a ideias citando que “o objetivo de projeto de um compósito é atingir uma combinação de propriedades que não é exibida por nenhum material isolado e, também, incorporar as melhores características de cada um dos materiais que o compõem.” (CALLISTER; RETHWISCH, 2016, p. 11).

Além do mais, os compósitos são constituídos por uma fase de reforço podendo ser material fibroso, partículas que são dispersas em uma matriz que confere estrutura ao material e que pode ser cerâmica, metálica ou polimérica. Normalmente são escolhidos os polímeros e os metais como os materiais de matrizes, por apresentarem boa ductilidade, qualidade que é reiteradamente requisitada.

2.2.4 Avançados

Os materiais avançados, são os aqueles dotados alta performance tecnológica. Para Callister e Rethwisch (2016, p. 11) basicamente, “esses materiais avançados são materiais tradicionais cujas propriedades foram aprimoradas e também materiais de alto desempenho que foram desenvolvidos recentemente”.

Os materiais avançados incluem os semicondutores (intermediários entre aos condutores e isolantes), biomateriais (projetados para substituir partes do corpo

humano), materiais inteligentes (aqueles que possuem sensores que monitoram o ambiente e mudam suas características) e nanomateriais (materiais que possuem suas dimensões na ordem de 10^{-9} m muito aplicado na eletrônica e na biomedicina). (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

2.2.5 Metais

Os metais são os elementos que se caracterizam pela sua rigidez, resistência, condutividade elétrica e condutividade térmica, possuem grande número de elétrons livres e representam mais de dois terços na Tabela periódica, os metais são maleáveis, dúcteis e geralmente mais densos do que outras substâncias elementares. (SMITH; HASHEMI, 2010).

Já Callister e Rethwisch (2016) consideram que:

Os *metais* são compostos por um ou mais elementos metálicos (por exemplo, ferro, alumínio, cobre, titânio, ouro e níquel), e com frequência também por elementos não metálicos (por exemplo, carbono, nitrogênio, oxigênio) em quantidades relativamente pequenas. (CALLISTER; RETHWISCH, 2016, p. 6, grifo do autor).

2.3 FALHAS EM METAIS

Máquinas e componentes mecânicos estão sujeitos a diversas condições durante seu ciclo de vida que podem levar a ocorrência de falhas. “Fatores como desgaste, corrosão, **fadiga**, fenômenos físico-químicos e acidentes, que ocorrem nas partes ou componentes e qualquer equipamento alteram suas condições normais.” (SCHEKIERA, 2011, p. 35, grifo nosso).

Para os Materiais de engenharia é muito importante que eles não apresentem falhas, devido aos altos custos financeiros pela indisponibilidade de um equipamento e riscos de acidentes graves. Porém é muito difícil uma garantia total em prevenção de falhas.

As falhas podem ser atribuídas por um ou por uma combinação dos seguintes mecanismos: seleção inadequada de material, projeto, fabricação, operação concomitantemente com exposição a condições ambientais severas nas quais não foram levadas em consideração no projeto.

Com isso, a se ver diante de um projeto de um componente, o engenheiro deverá frequentemente sempre minimizar a possibilidade de erro. Nessa conjunção, é muito importante estar ambientado com os princípios de projeto apropriados que

podem ser empregados para prevenir falhas durante o serviço, tal como entender e o mecanismo de diferentes falhas, ou seja, fratura, fluência e fadiga.

Concordando com isso Callister e Rethwisch (2016) nos alerta da importância de abordarmos os tópicos em relação à fratura simples, a fadiga e a fluência. “Essas discussões incluem os mecanismos das falhas, as técnicas de ensaio e os métodos pelos quais as falhas podem ser prevenidas ou controladas.” (CALLISTER; RETHWISCH, 2016, p. 231).

2.3.1 Fratura

Segundo Smith e Hashemi (2010), podemos considerar a fratura simples como sendo cisão em partes para um corpo que sofreu tensão estática, isto é, sofreu uma pressão constante com uma variação lenta em relação ao tempo. Cabe lembrar que a temperatura é baixa em relação a temperatura de fusão do metal.

Ainda enfatizando sobre o tópico fratura, Callister e Rethwisch (2016,) completa afirmando que:

Para os metais, pode haver dois modos de fratura: dúctil e frágil. A classificação está baseada na habilidade de um material apresentar deformação plástica. Os metais dúcteis exibem tipicamente uma deformação plástica substancial com grande absorção de energia antes da fratura. Por outro lado, acompanhando uma fratura frágil, há normalmente pouca ou nenhuma deformação plástica e baixa absorção de energia. (CALLISTER; RETHWISCH, 2016, p. 232).

2.3.2 Fluência

Alguns componentes ao operarem com altas temperaturas, que correspondam no mínimo entre 40% e 70% da temperatura absoluta de fusão do material, estão sujeitos a exposição a outros mecanismos de falha chamado fluência

A fluência é uma deformação plástica que ocorre em um material sob tensão constante abaixo do limite de escoamento em função de um tempo elevado. Nesse caso a temperatura elevada desempenha um papel importante neste fenômeno. “Definida como a deformação permanente e dependente do tempo de materiais submetidos a uma carga ou tensão constante, a fluência é geralmente um fenômeno indesejável e, com frequência, o fator limitante na vida útil de uma peça.” (CALLISTER; RETHWISCH, 2016, p. 258).

2.3.3 Fadiga

A fadiga de é um tema relativamente novo no campo da mecânica, a pesquisa é iniciada pelo engenheiro alemão August Wöhler por volta do século XIX que realizou os testes de ciclagem de carga para entender as falhas geradas em eixos de vagões ferroviários. Ao se comparar a outros campos de estudo da mecânica, é considerado um tema de estudo recente. (LIMA, 2018).

Entretanto, na realidade, existe uma amplitude diversificada em projetos relacionados a fadiga em constante desenvolvimento nos parques industriais e universidades para aprimorar as tecnologias já existentes. (SCHÖN, 2020).

Na engenharia, conteúdos científicos indicam que a fadiga é ocasionada por carregamentos cíclicos. Este tipo de carregamento também pode ser chamado de carregamento dinâmico e originam grandes custos que chegam a grandiosa ordem de até 80% dos valores totais gastos com um processo de prevenção de falha por colapso. (MARTINS, 2022).

Para Callister e Rethwisch (2016, p. 231) “O projeto de um componente ou estrutura exige, com frequência, que o engenheiro minimize a possibilidade de uma falha”. Com essa preocupação incessante de reduzir os custos e produzir constantemente determinados produtos, sejam eles metálicos ou não com a maior qualidade possível se faz necessário o estudo consistente deste fenômeno.

A incompreensão como também o descaso em relação a falhas por fadiga leva um componente a ter sua estrutura degradada, levando no final a ruptura. (BEER et al, 2021).

A fadiga mecânica é citada pela *American Society for Testing and Materials*² (ASTM) como a deterioração de forma localizada e também progressiva com sua conformação permanente que transcorre em material submetido a conjunções de carregamentos cíclicos que produzam tensões e deformações perduráveis, em um ou em diversos pontos que podem chegar a levar o item ao colapso culminando em trincas ou fratura total do equipamento após um número determinado de ciclos, isto é, é a deterioração gradativa dos materiais devido a eventos de carregamentos cíclicos, que podem levar a ruptura. (ASTM-E 823-96, 2000 apud BOTELHO, 2009).

Como fato da ocorrência de falhas se prevalecerem normalmente após uma grande intensidade de ciclos durante um longo período, tem-se a utilização do

² Em tradução livre: Sociedade Americana de Testagem e Materiais.

fenômeno da fadiga atribuído ao cansaço do referido material, sendo uma possibilidade de falha que pode atingir, componentes mecânicos, pontes, aeronaves, e máquinas dentre outros. (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

De acordo com Almeida (2018) é muito bem condizente salientar que a falha de um determinado componente mecânico pode ocorrer em decorrência de uma ou mais não conformidade e a uma ou mais condicionante do projeto

Beer et al. (2021) completa a observação relatada por Almeida (2018) nos relatando que é de extrema importância que, desde o início de algum projeto seja de um componente ou de uma máquina, estejamos sempre atentos para levar em conta o fenômeno da fadiga, tendo como objetivo garantir a sincronização de seu tempo limite de vida com a demanda de número de ciclos de carregamento necessários ao seu bom funcionamento. (BEER et al 2021).

Concomitante a isso, Callister e Rethwisch (2016) salientam em sua obra literária sobre a imensa responsabilidade do engenheiro na questão, para eles:

[...] a falha de materiais de engenharia é quase sempre um evento indesejável por várias razões, as quais incluem vidas humanas que são colocadas em risco, perdas econômicas, e interferência na disponibilidade de produtos e serviços. Embora as causas das falhas e o comportamento dos materiais possam ser conhecidos, é difícil garantir a prevenção de falhas. As causas comuns são a seleção e o processamento inadequados de materiais, além do projeto inadequado ou da má utilização de um componente. Também podem ocorrer danos às partes estruturais durante o serviço, e a inspeção regular e o reparo ou substituição são críticos para um projeto seguro. É responsabilidade do engenheiro antecipar e planejar levando em consideração possíveis falhas e, no caso de realmente ocorrer uma falha, avaliar sua causa e então tomar as medidas de prevenção apropriadas contra futuros incidentes. (CALLISTER; RETHWISCH, 2016, p. 231).

Ainda em relação aos engenheiros, Budynas e Nisbeth (2016, p. 5) cita que eles “estão associados à produção e ao processamento de energia e ao fornecimento de meios de produção, às ferramentas de transporte e às técnicas de automação. A base de conhecimento e habilidades é vasta”.

Isto posto, o engenheiro para atingir seu objetivo desempenha um fundamental papel que é realizar o desenvolvimento e a escolha de materiais que sejam ideais para a indústria ou que sejam o mais perto possível desse ideal, baseando-se em análise das condições e a inúmeros ensaios mecânicos a que deverá ser submetido. Conclui-se então que na engenharia a fadiga é um tipo de falha bem comum em seus diversos componentes, e de fato ao contrário das falhas ocorridas em decorrência de regime estático onde se tem um aviso prévio da situação, as falhas por fadiga são geralmente caracterizadas por propagações de trincas que leva a uma

súbita fratura, o que se torna deveras incerto e perigoso no universo da engenharia, principalmente na indústria aeronáutica. (SILVA, 2019).

Assim sendo no tocante a indústria aeronáutica a *Accident Investigation Board Norway*³ (AIBN) hoje denominada *Norwegian Safety Investigation Authority*⁴ (NSIA) nos revela detalhadamente no interior de seu relatório final de investigação que uma aeronave tipo helicóptero de nomenclatura *Airbus Helicopters EC225 LP Super Puma* prefixo *ON OJF* foi acometida por uma falha estrutural por fadiga mecânica em uma das engrenagens da Caixa de Transmissão Principal (CTP) que contribuiu para ocasionar o acidente que é objeto de estudo de caso deste trabalho.

Na ocasião, a CTP despreendeu da aeronave durante um voo que até então transcorria normalmente. Está aeronave que pertencia a uma empresa aérea Canadense chamada *Canadian Helicopter Company*⁵ (CHC), o ocorrido fez com que ela viesse a cair em uma pequena ilha no Mar do Norte na Noruega no dia 29 de abril de 2016 acarretando com o falecimento de seus 13 ocupantes. (AIBN, 2018). A figura 2 mostra a aeronave em operação antes do evento do acidente.

Figura 2: Aeronave EC225 da CHC antes do acidente.



Fonte: AIBN (2018)

³ Em tradução livre: Conselho de Investigação da Noruega.

⁴ Em tradução livre: Agência Norueguesa de Investigação de Segurança.

⁵ Em tradução livre: Companhia Canadense de Helicópteros.

2.4 FASES DA FADIGA MECÂNICA

As falhas por fadiga se inicia comumente com uma minúscula trinca em um material, estas são geradas a partir de elementos considerados como concentradores de tensão, isto é, detalhes presentes na peça onde as maiores tensões se concentram. Por conseguinte é de importância primordial que peças que serão submetidas a tensões dinâmicas sejam projetadas para minimiza-las para que com isso se tenha um ganho em vida útil do material.

Segundo Norton (2004) e Callister e Rethwisch (2016), existem três estágios bem característicos de uma falha por fadiga, são elas: início ou nucleação das trincas, propagação (linhas de praia) e ruptura. A figura 3 mostra a evolução da trinca.

Figura 3: Evolução da trinca.



Fonte: Zolin (2011).

Sendo que Callister e Rethwisch (2016) pormenorizam e distinguem bem essas três fases da fadiga como sendo:

(1) iniciação da trinca, na qual uma pequena trinca se forma em determinado ponto com alta concentração de tensões; (2) propagação da trinca, durante a qual essa trinca avança em incrementos com cada ciclo de tensão; e (3) a falha final, que ocorre muito rapidamente, uma vez que a trinca que está avançando tenha atingido um tamanho crítico. (CALLISTER E RETHWISCH, 2016, p. 254).

2.4.1 Primeira Fase (Nucleação)

A iniciação da trinca também é chamada comumente na literatura de nucleação da trinca, sendo esta a primeira de uma das três fases previstas da fadiga. Nessa fase Almeida (2018) salienta que as trincas surgem devido a não homogeneidade das superfícies granulares e cristalinas dos metais. Sendo que nesta primeira etapa o crescimento da trinca ocorre a 45° em relação à direção da solicitação, e que quando chega a um determinado tamanho a própria trinca muda de direção se propagando a partir daí de forma descontínua e perpendicularmente à tensão normal máxima. Cabe lembrar que “A denominação normal ocorre, em virtude de ser perpendicular, à secção transversal”. (MELCONIAN, 2012, p. 31).

2.4.2 Segunda Fase (Propagação)

Após a nucleação da trinca acontece a segunda fase que é a propagação, nessa etapa aparece em sua superfície um aspecto macroscópico característico chamado marcas de praia. (*ENSUS ADVANCED ENGINNERING*, 2016).

Nesta fase que contempla a quase totalidade da vida do componente, todavia a propagação da trinca nesta fase, ocorre ao longo de direções de tensão de tração, podendo ocorrer de forma transgranular como também de forma intergranular. (ALMEIDA, 2018).

2.4.3 Terceira Fase (Ruptura)

Seguindo o processo, na terceira fase da trinca Almeida (2018, p. 86) afirma nos que “atingido um valor crítico do comprimento da trinca, dá-se a ruptura instável (de aparência frágil) e repentina do componente, numa condição de tensão normalmente inferior à própria tensão de escoamento do material”.

2.5 ENSAIOS DE FADIGA MECÂNICA

Ensaio de fadiga mecânica consiste na simulação em laboratório com um corpo de prova para designar as características mecânicas dos materiais, ao realizar esse ensaio deve se ter projetado para reproduzir o máximo possível as condições de estresse que ocorrem durante o uso.

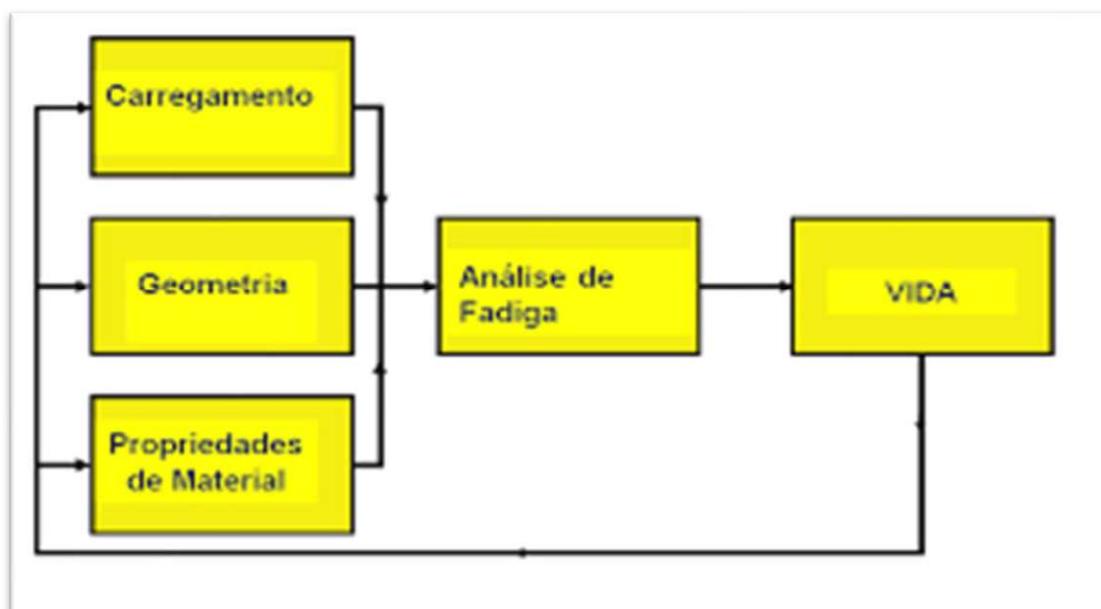
Os ensaios de fadiga demandam que o analisador tenha em sua posse as seguintes informações: geometria do componente, carregamento aplicado e propriedades de material. De posse delas e por meio de uma metodologia adequada, obtém-se a durabilidade do componente, tal como a sua vida útil, isto é, seu limite de vida. A figura 4 mostra a idealização sobre o fluxo de informação para se ter estimativa de vida em fadiga calculada para um corpo de prova.

Para Rosa (2002) é importante sabermos que:

[...] os primeiros ensaios de fadiga para pesquisar a resistência a carregamentos cíclicos foram feitos com corpos de prova de seção circular, submetidos a esforços de flexão e postos a girar. Contando-se o número de rotações até a ruptura do corpo de prova, temos o número de ciclos que o material suportou, até a falha, correspondente ao nível de tensão cíclica atuante. (ROSA, 2002, p. 250).

A figura 4 demonstra a idealização sobre o fluxo de informação para se ter estimativa de vida em fadiga calculada para um corpo de prova.

Figura 4 - Fluxo de informação para estimativa de vida.



Fonte: Araujo (2017).

Com isso podemos concluir que os ensaios servem para poder medir o limite de tensão que um determinado material resiste, ou seja, abaixo desta tensão que foi estabelecida, haverá a garantia que o material suportará ciclos infinitos sem haver o colapso. (LIMA, 2018). Sendo assim é possível ter uma definição de aplicação de tipos de ensaios nos materiais, sendo os principais: tração, tração-compressão, torção,

flexão, flexão-rotativa. Porém nem todos os materiais possuem o limite de resistência a fadiga.

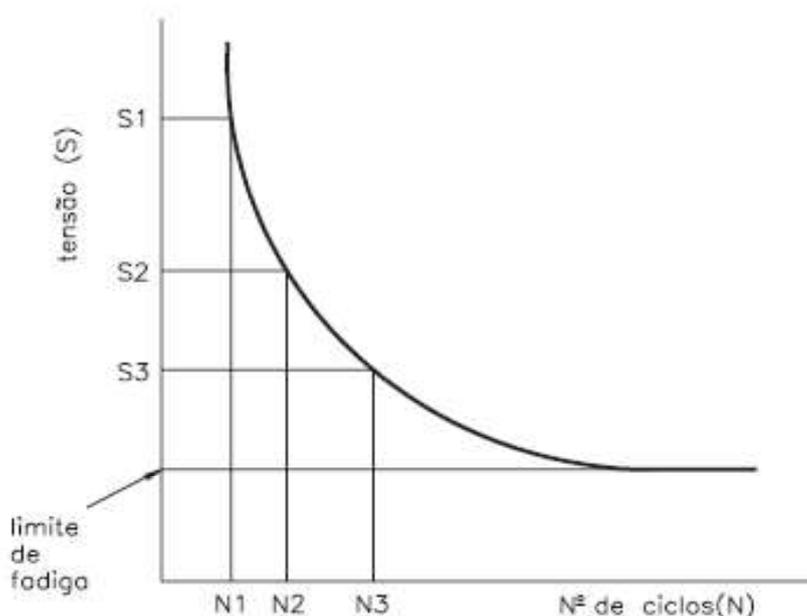
Sendo o tipo mais usado comumente em um ambiente de laboratório no qual é empregado um eixo com rotação e flexão, neste ensaio as tensões são aplicadas com revezamento entre tração e compressão de iguais valores, impondo ao corpo de prova a mesma intensidade. Tudo isso simultaneamente a flexão e a rotação.

2.6 TENSÕES LIMITE DE FADIGA

Tensão é uma grandeza vetorial e segundo Melconian (2012) pode ser entendida como sendo a resistência interna de um corpo qualquer, à aplicação de uma força externa por unidade de área, ou seja, é força por unidade de área.

Para Botelho (2009), para se obter a tensão limite de fadiga, é necessário um corpo de prova, o qual deve ser submetido a um ensaio no qual fiquem sujeitos a forças recorrentes e variadas enquanto são contabilizadas as inversões das tensões até que o referido corpo de prova chegue ao colapso/destruição desses corpos-de-prova. Com esse resultado dos testes, confecciona-se um diagrama de tensões-ciclos conforme Figura 5, chamamos esse diagrama de curva S-N ou também conhecido como curva de Wöhler, em homenagem ao engenheiro alemão August Wöhler.

Figura 5 - Curva S-N.



Fonte: Botelho (2009).

Para melhor entendimento da curva S-N, suponha-se que um corpo de prova teve uma solicitação de tensão S_1 e atingiu o colapso com o número de ciclos N_1 , e já para uma solicitação S_2 obteve o rompimento em N_2 ciclos, seguindo esse raciocínio monta-se o diagrama S-N.

2.7 MODIFICADORES DA TENSÃO LIMITE DE FADIGA

Como os ensaios de fadiga mecânica são executados em laboratório com corpo de provas padronizados, não é possível aplicar diretamente os conceitos do gráfico da curva S-N, pois na realidade possuem situação bem distinta de um componente em trabalho em uma máquina.

Segue as descrições dos fatores principais na determinação da tensão limite da fadiga suportado pelo material.

2.7.1 Fator de Superfície (K_a)

As falhas por fadiga podem ser iniciadas no componente em sua superfície. Com isso as condições de superfície são primordiais na vida em fadiga. Como esse fator leva em consideração o acabamento da superfície, sendo que é bem importante ter conhecimento deste fato, pois permite que os projetistas escolham superfícies que melhoram o desempenho em condições propensas à fadiga. (NORTON, 2004).

2.7.2 Fator de Tamanho (K_b)

Os corpos de prova submetidos a ensaios, são devido a normalização de dimensões bem pequenas, se comparados as de um componente real. Tendo em vista isso, se deve aplicar uma correção chamada fator de tamanho, sempre que um componente tiver o diâmetro maior que o corpo de prova utilizado. (TRONCO, 2016).

2.7.3 Fator de Confiabilidade (K_c)

O Fator de Confiabilidade expressa a confiança, isto é, a certeza esperada no limite da resistência, que são tabelados em valores estimados. Existindo uma dispersão nos ensaios realizados com o mesmo material sob condições semelhantes de ensaio.

De acordo com Rosa (2002), este fator leva em consideração a imposição de fatores respeitando o grau de confiabilidade esperado de um componente ou material, onde acontece uma considerável dispersão dos resultados nos processos de falhas por fadiga.

Deste modo, os dados da resistência de fadiga do projeto são usados com um nível de segurança que considere a dispersão existente. Quanto maior a confiabilidade que se deseja, inversamente será o valor do fator (K_c), isto é, será um valor menor. (NORTON, 2004).

2.7.4 Fator de Temperatura (K_d)

Os componentes são utilizados em seus ensaios usualmente a temperatura ambiente. Quando forem submetidos a qualquer temperatura diferente das padronizadas nos ensaios de laboratório aplica-se então uma correção através de fórmulas já existentes para assim determinar um novo fator condicionado a esta nova temperatura. (ROSA, 2002).

2.7.5 Fator de carregamento (K_e)

Os ensaios de fadiga têm seus dados obtidos comumente através de flexão rotativa. Sendo assim quando confrontado com um componente real e este estiver sujeito a condições de carregamento diferente, terá que se fazer uso de um fator de correção. Tronco (2016) concorda com o exposto e nos diz que: “Sabendo-se que os ensaios de fadiga realizados são sob flexão rotativa, assim, um fator de redução a resistência para solicitação devido à força normal deve ser aplicado.” (TRONCO, 2016, p. 37).

2.7.6 Fator de Efeitos Diversos (K_f)

O Fator de efeitos diversos é o fator que está ligado diretamente à experiência e ao bom senso do Engenheiro do projeto ou Projetista, nele não se tem valores predeterminados. Está relacionado a tensões residuais, características da operação, ambiente corrosivo e tratamentos superficiais aplicados no material (ROSA, 2002).

2.8 PROJETO PARA FADIGA

A consulta as principais literaturas do assunto nos faz compreender que existem três critérios para projetos de elementos sobre ação da fadiga mecânica sendo eles: vida infinita, vida finita e Sujeito à Falha em Segurança (*fail-safe*).

2.8.1 Projeto para vida infinita

No passado os engenheiros e projetistas dimensionavam suas peças de uma maneira que as tensões ficassem com um valor bastante abaixo da tensão limite de fadiga, desse modo o componente era livre do processo de fadiga por um tempo indeterminado, ou seja, sem limite de vida. Entretanto esse dimensionamento demasiado proporcionava, um aumento considerável de peso e de custos.

Rosa (2002) completa dizendo que “este é o enfoque mais clássico da análise de fadiga, usando os conceitos da curva de Woehler e da tensão limite de fadiga, tendo sido proposta ainda no século passado”.

Inicialmente se pressupõe que o método projeto para vida infinita possa parecer ultrapassado, porém não é um fato concreto, ainda hoje, existe a necessidade de se realizar projetos de peças com limite de vida infinita, dado que podem suportar carregamentos cíclicos constantes por vários milhões de ciclos, temos como exemplo as engrenagens industriais, molas de válvulas de motores e eixos de motores. (NORTON, 2004).

2.8.2 Projeto de Vida Finita

O projeto de vida finita significa que o componente vai falhar por fadiga em um determinado número de ciclos, sendo que para Tronco (2016):

A melhor informação a respeito da resistência à fadiga de um material para uma vida finita, ou seu limite de resistência à fadiga para uma vida infinita, provém de ensaios com montagens reais ou com os protótipos dos dispositivos de um projeto real. (TRONCO, 2016, p. 35 e 36).

Como alguns itens operam com cargas inconstantes, não há como dimensioná-los para a carga máxima que podem suportar transportar, podendo ser que essa sua carga máxima possa ser atingida um número pequeno de vezes durante seu ciclo de vida.

Concomitante a isso Rosa (2002) entende que:

[...] em muitas ocasiões as condições de carregamento são sensivelmente imprevisíveis, ou, ao menos, inconstantes. Assim, se um componente for projetado para a carga máxima esperada, as dimensões, peso, custo, etc., serão excessivos, desnecessários, pois a carga máxima ocorrerá apenas algumas poucas vezes ao longo da vida útil do equipamento; logo o projeto para vida finita sob a ação destas cargas é plenamente justificável. (ROSA, 2002, p. 245).

2.8.3 Projeto Sujeito à Falha em Segurança (*Fail Safe*)

O Projeto Sujeito à Falha em Segurança (*Fail Safe*) visa abordar as discrepâncias de força e peso dos equipamentos de aviação, e um tipo de critério que foi desenvolvido pelos engenheiros aeronáuticos, já que estes não poderiam tolerar o adicional requerido por um coeficiente de segurança alto, nem o risco de falha iminente em um coeficiente muito baixo.

Sendo assim o critério para falha segura considera a possibilidade de ocorrência de trincas de fadiga, isto é, os danos devido à fadiga do componente são toleráveis, porém dispõem a estrutura de modo que as trincas não a levem ao colapso antes de serem detectadas e reparadas. A pesquisa de propagação de rachaduras é uma inspeção necessária antes que um componente quebre repentinamente. (ROSA, 2002).

Assegurando o exposto acima Rosa (2002) ainda disserta salientando que uma outra maneira de evitar danos catastróficos devido à propagação inesperada de trincas é introduzir um bloqueador de propagação de trincas e usar juntas rebitadas ou aparafusadas em vez de juntas soldadas, temos como exemplo: cascos de navios, estrutura de pontes e fuselagem de aeronaves. (ROSA, 2002).

3 METODOLOGIA

Este capítulo é reservado ao desenvolvimento metodológico com a finalidade de atender os objetivos definidos neste trabalho. Sendo que a proposta é analisar a fadiga em componentes mecânicos, tendo como teor de base um acidente aeronáutico ocorrido com uma aeronave tipo helicóptero *Airbus Helicopters EC225 LP Super Puma* em 29 de abril de 2016 no Mar na Noruega. Na qual esse fenômeno foi fator contribuinte para acontecimento do mesmo.

Segundo Silva e Menezes (2005, apud AZEVEDO; ENSSLIN, 2020) quanto à natureza da pesquisa e classificada como Pesquisa Básica ou Pesquisa Aplicada. Porém podemos classificá-la similarmente como Pesquisa Teórica ou Pesquisa Prática (TASCA, *et al.*, 2010, apud AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

Esse estudo tem por finalidade quanto à natureza realizar uma pesquisa aplicada, uma vez que utilizará conhecimento da pesquisa fundamental para resolver problemas.

No que se refere a tratamento dos objetivos e melhor apreciação desta pesquisa, observou-se que ela é classificada como pesquisa explicativa. (GIL, 2002). Pois vem de encontro ao mencionado na obra de Vieira (2011) que cita que “O objetivo da pesquisa explicativa é **apontar as causas** e as consequências dos fenômenos observados e explicar os mecanismos e os processos envolvidos, em todos os pormenores.” (VIEIRA, 2011, p. 49, grifo do autor).

A pesquisa de abordagem qualitativa considera sempre como uma interação dinâmica, isto é, o pesquisador mantém contato direto com o ambiente pesquisado e este é uma fonte direta dos dados. (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Considerando isso (GIL, 2002) menciona ainda em seus estudos sobre a mesma ótica que: “A análise qualitativa depende de muitos fatores, tais como a natureza dos dados coletados, a extensão da amostra, os instrumentos de pesquisa e os pressupostos teóricos que nortearam a investigação”. (GIL, 2002, p. 133).

Conjecturando com esses autores acima, mencionamos em nossa pesquisa uma abordagem qualitativa, pois é menos formal do que a análise quantitativa, sendo que “os métodos qualitativos trazem como contribuição ao trabalho de pesquisa uma mistura de procedimentos de cunho racional e intuitivo capazes de contribuir para a melhor compreensão dos fenômenos”. (VIEIRA, 2011, p. 87).

Os procedimentos técnicos, abrange toda a gama de decisões e ações na escolha de métodos de pesquisa, isto é, correspondem a todo conjunto de tomada de

decisões e ações quanto à escolha das técnicas de pesquisa e método para o desenvolvimento de um trabalho científico.

Como forma de verificar os fatores contribuintes e compreender como se origina o fenômeno estudado, correlacionando tal conhecimento com abordagens já trabalhadas por outros autores, classificamos a pesquisa quanto a procedimentos técnicos em pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, estudo de caso, bem como também a utilização de pesquisa por observação participante.

É uma pesquisa bibliográfica no momento em que se faz uso de materiais já elaborados, centrados em livros, artigos científicos de periódicos, revistas, e enciclopédias e documentos disponibilizados na Internet na busca e alocação de conhecimento sobre falhas por fadiga mecânica.

Concluindo Gil (2002, p.88) afirma que “a pesquisa bibliográfica costuma ser desenvolvida como parte de uma pesquisa mais ampla, visando identificar o conhecimento disponível sobre o assunto”.

Porém recorrerá também à pesquisa documental, pois se utilizará de documentos emitidos pela AIBN, sobre o acidente com a aeronave e também efetuará um estudo de caso, pois a narrativa se desenvolve com o estudo de caso sobre o acidente do dia 29 de abril com a aeronave EC225 LP Super Puma.

Entendemos que é um estudo de caso, porque são procedimentos importantes, os quais são estudados profundamente e minuciosamente que permitem um conhecimento mais amplo e detalhado do conteúdo apresentado na obra para uma melhor compreensão.

Estudo de caso é uma pesquisa qualitativa que se caracteriza por ampliar as lições aprendidas de modo metódico de um caso específico, contextualizando para modelos mais genéricos. (VIEIRA, 2011).

Sendo assim, consolidamos que o estudo de caso “consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento, tarefa praticamente impossível mediante outros delineamentos já considerados.” (GIL, 2002, p. 54).

É finalizando para realização do estudo de caso viu-se a necessidade de utilização da pesquisa documental, bem como a pesquisa observação participante, esta última pesquisa tem como característica participação do pesquisador de maneira ativa na observação do fenômeno estudado. (PRODANOV; FREITAS, 2013).

3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os Procedimentos Metodológicos também chamados de Percurso Metodológico correspondem a todo conjunto de tomada de decisões e ações quanto à escolha das técnicas de pesquisa e método para o desenvolvimento de um trabalho científico.

A sua principal diferença entre metodologia e procedimentos metodológicos é que a primeira estuda os caminhos da produção do conhecimento, ao invés disso, os procedimentos metodológicos envolve todas as técnicas, escolhas e opções do pesquisador na aplicação dos métodos de pesquisa.

Vindo ao encontro disso Lima e Mioto (2007) enfatiza muito bem essa questão dos procedimentos metodológicos, é o espaço no qual:

[...] reafirma-se a importância de definir e de expor com clareza o método e os procedimentos metodológicos (tipo de pesquisa, universo delimitado, instrumento de coleta de dados) que envolverão a sua execução, detalhando as fontes, de modo a apresentar as lentes que guiaram todo o processo de investigação e de análise da proposta. (LIMA; MIOTO, 2007, p. 39).

A partir do exposto e com intuito de atingir os objetivos propostos para esta pesquisa e responder as questões levantadas na introdução deste trabalho, foram executados diversos procedimentos metodológicos, sempre visando o conhecimento e o aprofundamento do estudo sobre o tema.

Para realização da pesquisa bibliográfica para compor o referencial teórico, foi realizado inicialmente uma lista com os nomes de livros de grandes autores referente ao tema e as palavras chaves citadas no Resumo. De posse dessa lista as obras foram disponibilizadas através de quatro modos distintos: 1- Acervo pessoal; 2- Consulta na biblioteca da Instituição; 3- Consulta em *e-book* na internet na plataforma Grupogen e 4- Consulta de trechos disponibilizados na plataforma Google Livros.

Os livros foram consultados minuciosamente para compor entendimento aos assuntos pesquisados. Além disso, para complementar as questões estudadas foram consultados artigos científicos de periódicos, sites e documentos disponibilizados na Internet, através das plataformas Google Acadêmico, Scielo, Biblioteca Digital Br e Biblioteca Virtual Pearson e pesquisa livre em site de busca. Como a pesquisa resultou num numero elevado de publicações, foram separadas as 20 obras de maior relevância para alocação de conhecimento.

Este trabalho também se fez uso da pesquisa documental, pois se utilizou de documentos emitidos para realizar o Estudo de Caso do acidente aeronáutico com

helicóptero ao qual se refere este trabalho. Os referidos documentos foram consultados e disponibilizados pela internet através de pesquisa no site oficial do fabricante da aeronave (www.airbus.com), no site da Agência Norueguesa de Investigação e Segurança (www.nsia.no), no site da filial Brasileira da fabricante da aeronave (www.helibras.com.br) e no site da força Aérea Brasileira (www.fab.mil.br).

Concluindo, foi realizada também para elucidar o estudo de caso uma pesquisa observação participante, na qual segundo Prodanov e Freitas (2013), o pesquisador integra o universo pesquisado. Dessa forma foi observada a operação e manutenção de uma aeronave similar a acidentada na Noruega, pertencente ao 4º Batalhão de Aviação do Exército sediado em Manaus - AM, sendo que foi analisadas as medidas mitigadoras determinadas pelo fabricante da aeronave, assim como elencado as oportunidades de melhoria no processo visando o aperfeiçoamento profissional.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se no estudo do fenômeno da fadiga mecânica, tendo como foco a observação do acidente aeronáutico ocorrido em 29 de abril de 2016 na Noruega com uma aeronave EC225 da empresa CHC. Este acidente culminou com a paralisação total em todos os países do mundo das atividades aéreas de toda a frota deste modelo de helicóptero.

Segundo *AIRBUS* (2022), o helicóptero EC225 é um dos mais modernos da atualidade, pois é uma aeronave biturbina equipado com dois potentes motores de turbina *Safran Makila 2A1*, com capacidade de 11 toneladas, possui longo alcance sendo capaz de transportar até 24 passageiros, e mais 3 tripulantes, ideal para meios inóspitos e difíceis, pois oferece a melhor velocidade, alcance, carga útil e confiabilidade do setor de um helicóptero.

Além disso, *AIRBUS* (2022), completa que sua capacidade de carga útil e alcance tornam o EC225 o helicóptero mais econômico para mudanças de funcionários de plataformas marítimas de longa distância. Sendo que também possui alta capacidade de carga útil e configurações versáteis para atender a missões como:

- ✓ Combate a incêndios;
- ✓ Trabalho aéreo;
- ✓ Transporte de passageiros;
- ✓ Transporte de autoridades;
- ✓ Missão de segurança pública;
- ✓ Busca e salvamento (SAR);
- ✓ Evacuação aeromédica.

Grande enfoque e dado em seu cockpit,⁶ pois se trata de diversas telas digitais de última geração como visto na figura. Além disso, esse modelo de aeronave é dotada de um sistema chamado *Modular Aircraft Recording and Monitoring System* (M'ARMS⁷) que conduz a gravação de dados de voo e o monitoramento proativo do funcionamento de diversos componentes. (PESSANHA, 2022). A figura 6 apresenta a concepção moderna do *cockpit*.

⁶ Em tradução livre: Cabine de Pilotagem.

⁷ Em tradução livre: Sistema Modular de Monitoramento de Gravação de Aeronaves

Figura 6 - Cockpit do EC225.



Fonte: AIRBUS 2022.

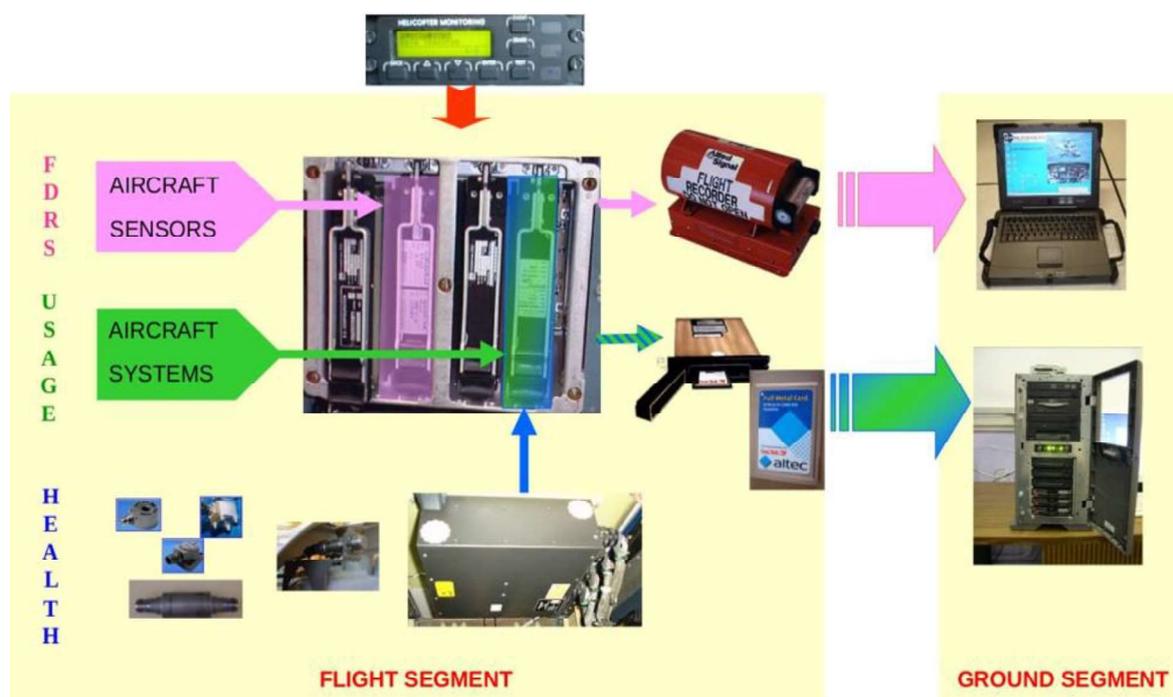
O M'ARMS Garante 3 funções distintas sendo elas:

- ✓ *Flight Data Recorder System (FDRS)*, que consiste na gravação passiva da conversação da tripulação;
- ✓ Monitoramento de USO, que compreende o cálculo de horas de voo, tempo de operação, e de ciclos;
- ✓ Monitoramento de SAÚDE, que se constitui do acompanhamento de peças rotativas.

O Monitoramento de USO e o Monitoramento de SAÚDE formam um modulo chamado *Health and Usage Monitoring Systems (HUMS⁸)* que é composto por diversos sensores acelerômetros distribuídos na aeronave, que registra os dados de voo e de componentes críticos como peças vibratórias significativas, eixos, ventiladores, sistemas de rotor, em um esforço para que um diagnóstico precoce possa ocorrer. O equipamento de bordo armazena dados em cartão PCMCIA que é baixado após o voo e a análise de manutenção é realizada em um computador baseado em terra. Conforme figura 7.

⁸ Em tradução livre: Sistemas de monitoramento de saúde e uso.

Figura 7 - Sistema de Monitoramento M'ARMS.



Fonte: HELIBRAS (2015).

De acordo com HELIBRAS (2015), o sistema de aviônicos⁹ e piloto automático também são de última geração reduzindo a carga de trabalho e aumentando a segurança. A tripulação ainda se beneficia de um módulo automático de aproximação para helipontos, o qual é capaz de conduzir o helicóptero até o ponto ideal de pouso em plataformas petrolíferas em alto-mar. (AIRBUS, 2022).

Cabe ressaltar a peculiaridade quanto a nomenclatura, a versão civil chamava-se EC225 ao ser adaptada para o meio militar a aeronave recebia alguns incrementos específicos para o meio militar e passava a possuir a denominação EC725.

Segundo a HELIBRAS (2015) a AIRBUS fez um realinhamento quanto a nomenclatura, com a introdução de nova identificação dos produtos da empresa, passando a levar a letra “H” e seguir o mesmo padrão utilizado nos jatos comerciais, que utiliza a letra “A” em sua denominação. Tal realinhamento foi concluído com a adição da letra “M” nas versões militares. A tabela 1 demonstra o realinhamento da nomenclatura realizado.

⁹ Sistema elétrico e eletrônico de uma aeronave.

Tabela 1 - Nomenclatura.

	Nomenclatura anterior	Nomenclatura atual
Versão civil	EC225	H225
Versão militar	EC725	H225M

Fonte: adaptado de HELIBRAS (2015).

Sendo assim podemos observar que o modelo EC225 é largamente utilizado devido a suas capacidades operacionais. No mundo mais de 30 países a operam, sendo a escolha de operadores comerciais e agências governamentais. Como no caso do Brasil que por meio do projeto H-XBR iniciado em 2008 pelo Governo Federal adquiriu 50 aeronaves do mesmo modelo, para serem distribuídos em número de 16 para cada uma das Forças Armadas, e ainda mais dois foram reservados ao Grupo de Transporte Especial (GTE) da Força Aérea Brasileira (FAB) para o transporte do Chefe do Poder Executivo Brasileiro, conforme a figura 8.

Figura 8 - EC225 (H225M) do GTE.

Fonte: BRASIL (2012).

Dos 50 helicópteros previstos no projeto H-XBR 40 já foram entregues até o momento, na figura 9 e possível observar uma das aeronaves EC225 (H225M) do Exército Brasileiro que opera na região amazônica, a partir de sua sede no 4º Batalhão de Aviação do Exército (4º BAvEx) na cidade de Manaus no Estado do Amazonas.

Figura 9 - EC225 (H225M) do 4º BAvEX.



Fonte: Brito (2019).

O Projeto H-XBR não visa somente à aquisição de aeronaves, mas também projetos de transferência de tecnologia para a indústria brasileira, dentre eles a própria fabricação do modelo EC225 pela empresa HELIBRAS sediada no Sul de Minas na Cidade de Itajubá, como também a potencialidade de outras indústrias fabricarem e fornecerem peças. Como exemplo a empresa Toyomatic sediada em Bragança Paulista-SP que teve a possibilidade de capacitar seu corpo técnico no exterior para desenvolverem integralmente componentes do conjunto rotativo principal, que são essenciais no funcionamento do helicóptero. (BRASIL, 2015).

Ainda segundo BRASIL (2015) e HELIBRAS (2015), outro produto do projeto foi a construção do Centro de Treinamento e Simuladores no Recreio dos Bandeirantes, no Rio de Janeiro-RJ. Esse simulador inaugurado em 2015 é do tipo *Full Flight Simulator* (FFS¹⁰), isto é, confere uma dimensão mais realística

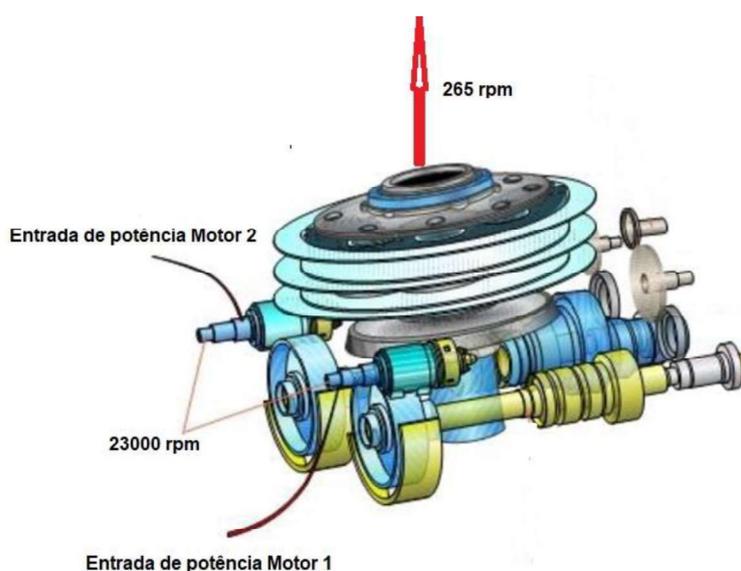
¹⁰ Em tradução livre: Simulador de voo completo.

possível ao treinamento, este simulador é o terceiro deste tipo no Mundo, e o único no continente americano, sendo que antes esse treinamento era realizado somente na França ou Inglaterra. (HELIBRAS, 2015).

Diante de narração minuciosa quanto ao helicóptero EC225, podemos perceber que realmente é dotado da mais alta e moderna tecnologia em asas rotativas. Todavia seu complexo sistema de monitoramento que é composto por detectores magnéticos, que detectam partículas metálicas que venham a se desprender de algum componente, como o sistema de monitoramento de uso e saúde (HUMS) não detectaram em tempo hábil um estado anômalo numa das oito engrenagens que compõem o conjunto planetário da Caixa de Transmissão Principal (CTP). Esta engrenagem veio a colapso, fazendo com que a parte superior da CTP desprendesse da aeronave, ocasionando sua queda.

A CTP é a caixa de engrenagens principal, um mecanismo chave em uma aeronave, uma vez que transmite a velocidade de rotação de 23.000 rpm originada nos motores, e reduz para uma velocidade de 265 rpm para o rotor principal (figura 10). O seu interior é formado por uma série de estágios de redução chamado módulo epicicloidal, compreendendo engrenagens fabricadas com os melhores tratamentos de material e superfície tecnologias e em linha com os mais altos padrões de qualidade. Porém a redução de velocidade acarreta carregamentos cíclicos nessas engrenagens como já visto anteriormente.

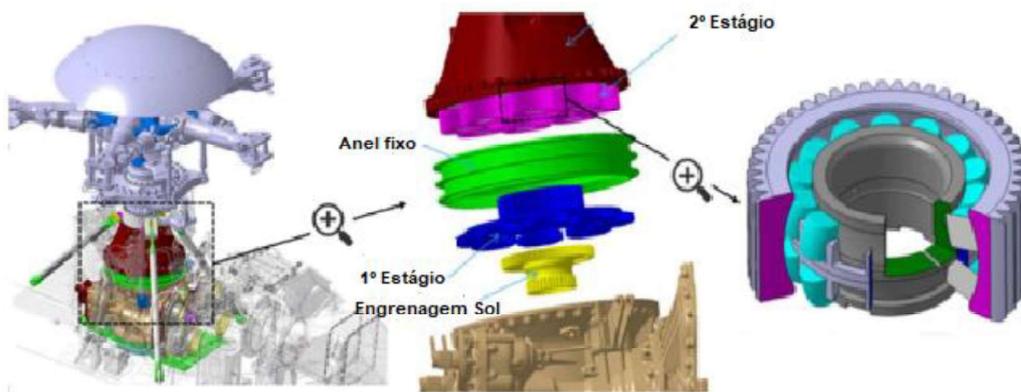
Figura 10 - Redução de velocidade na CTP.



Fonte: Adaptado de EC225. T1 (2015).

O primeiro e o segundo estágio de engrenagens compreende cada: uma engrenagem Sol, oito engrenagens planetárias, e um anel fixo (figura 11 e 12). Exatamente em uma dessas engrenagens ocorreu uma fratura por fadiga mecânica. A fratura por fadiga teve seu início na superfície da pista externa superior do rolamento, propagando-se na subsuperfície enquanto produz uma quantidade limitada de partículas de fragmentação, antes de virar em direção aos dentes da engrenagem e fraturar o aro da engrenagem sem ser detectada.

Figura 11 - Vista detalhada da CTP.



Fonte: Adaptado de ABIN (2018).

Figura 12 - Vista detalhada da CTP.



Fonte: Adaptado de ABIN (2018).

A vista de baixo das oito engrenagens planetárias de segundo estágio da Caixa de Transmissão Principal da aeronave EC 225 são mostradas na figura 13.

Figura 13 - Engrenagens planetárias de segundo estágio da CTP do EC225.



Fonte: ABIN (2018).

Segundo ABIN (2108) essas engrenagens são feitas de aço 16NCD13 cementado para garantir melhor dureza, resistência superficial e, conseqüentemente resistência a fadiga. Pela figura 14 é possível observar as engrenagens da segunda planetária da aeronave acidentada que foram resgatadas após o acidente.

Figura 14 - Engrenagens da segunda planetária da aeronave acidentada.



Fonte: ABIN (2018).

A fratura por fadiga através do aro começou na pista superior externa da roda de engrenagem planetária para onde a seta vermelha aponta na figura 15.

Figura 15 - Região da fratura.



Fonte: ABIN (2018).

A superfície de fratura à esquerda na Figura 16, indicado pela seta amarela, mostra a mesma de outro ângulo.

Figura 16 - Superfície da fratura.



Fonte: ABIN (2018).

A superfície de fratura de espessura após a limpeza, onde pode se observar as marcas de praia na engrenagem no lado esquerdo na fotografia.

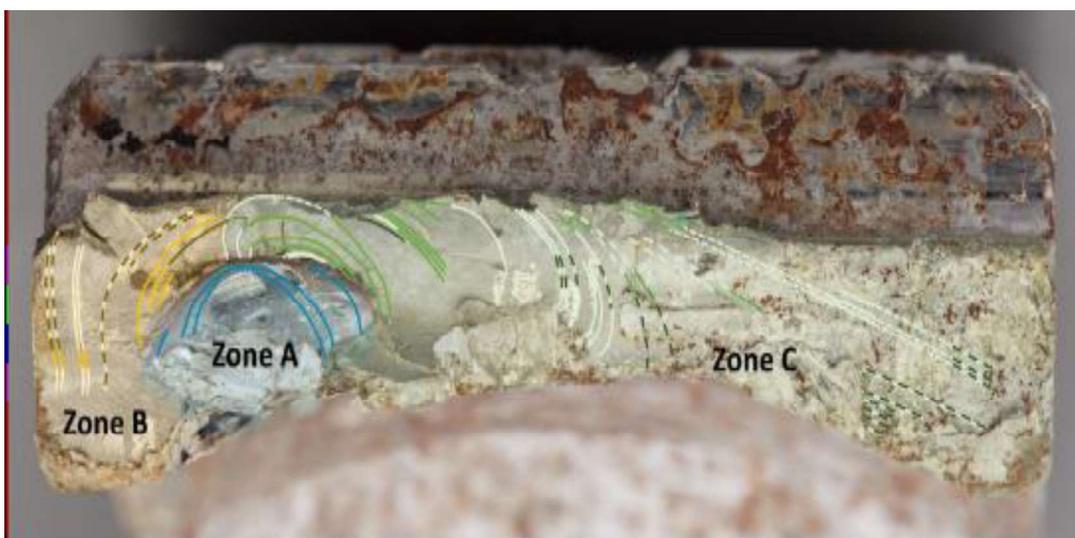
Figura 17 - Superfície após limpeza.



Fonte: ABIN (2018).

Para descrever o crescimento da fratura, a superfície foi dividida em três zonas; Zona A, B e C. Na figura 18 podemos observar as zonas A, B e C, que correspondem as Zonas 1, 2 e 3 da figura 3, conforme citado por Norton (2004) e Callister e Rethwisch (2016) sobre evolução da trinca.

Figura 18 - Divisão da superfície em zonas.



Fonte: ABIN (2018).

Em seu relatório final de investigação a Agência Norueguesa de Investigação de Segurança divulga que a combinação de propriedades do material, tratamento de superfície, design, ambiente de carga operacional e detritos deu origem a um modo de falha que não foi antecipado ou avaliado. Essa conclusão foi possível após exame exaustivo da árvore de falhas e também utilização de modelos numéricos complexos em simulações de diferentes modos de falha comparando-os com as observações reais.

De acordo com o relatório o relatório final os fatores contribuintes para o acidente foram:

- ✓ O fenômeno da fadiga mecânica;
- ✓ Sistema de monitoramento de partículas metálicas ineficiente;
- ✓ Diferença geométrica entre fabricantes dos rolamentos;
- ✓ Impacto anterior da CTP;
- ✓ Contaminação do sistema de engrenagens por partículas externas.

Para cada fator contribuinte foi emitido recomendações e diretrizes específicas para eliminar ou mitigar os fatos acontecidos.

A fadiga mecânica como já estudado neste trabalho é o fenômeno no qual está sujeito o metal exposto a alta tensão repetidas vezes. Com base na aprendizagem com o acidente, o ciclo de vida dos componentes envolvidos teve uma redução por um fator de quatro.

O Sistema de monitoramento de partículas metálicas era monitorado com plugues magnéticos que coletam as partículas metálicas em caso deterioração de algum componente, como a prática de detecção de partículas não foi suficiente, foi então aumentada a capacidade de captação de partículas por meio de instalação de plugue magnético com maior desempenho, aumento da frequência das inspeções e novos e estritos critérios relacionados à detecção de tamanhos de partícula.

Outro fator potencial de contribuição é ligado ao design da engrenagem planetária, dois fornecedores fabricavam estas engrenagens e seus projetos não eram 100% idênticos, mesmo ambos correspondendo às especificações técnicas. A adoção de somente um fornecedor da engrenagem foi a solução para este fator contribuinte.

Para o impacto sofrido no transporte da CTP antes da montagem no helicóptero, foram tomadas as seguintes medidas: retirada de serviço de qualquer

CTP que venha sofrer qualquer choque, sistema de amortecimento nas caixas de transporte e colocação de sensores de eventos que capturam parâmetros como temperatura, inclinação, iluminação, altitude e pressão durante o transporte.

O último potencial fator contribuinte a contaminação pela descoberta de impurezas, medidas adicionais foram colocados em prática para proteger a CTP durante a manutenção. Senso assim as operações e desmontagem dos módulos só podem ser realizado pela Airbus ou centro de manutenção ou reparo certificado.

Com a adoção das medidas acima as agências de aviação no mundo todo aprovaram a volta ao serviço desse modelo de aeronave, e acumula desde então milhares de horas de voo satisfatórios, o que prova que as medidas adotadas surtiram o efeito esperado, contribuindo para segurança e para aeronavegabilidade continuada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento do fenômeno da fadiga mecânica é de suma importância no ramo da mecânica, pois por meio deste será possível determinar qual o melhor material para construção de um componente, peça ou produto, estimar o ciclo de vida, verificar seu comportamento quando em operação. Efetuando a previsibilidade e programando as manutenções antes de uma falha catastrófica, evita-se a perda de produtividade e conseqüentemente perdas nos ativos da empresa.

Somando-se a esse fator econômico, o estudo da fadiga é de grande importância na prevenção e redução de acidentes, pois muitos deles têm origem nas perdas das propriedades de um componente.

Aprofundando o estudo da fadiga mecânica, pode-se observar a evolução em fases bem características desde a nucleação, passando pela propagação e por último a ruptura. Assim como os ensaios de fadiga mecânica que consistem na simulação em laboratório com um corpo de prova para designar as características mecânicas dos materiais, como seu limite de tensão.

Na continuidade ao estudo da fadiga mecânica foi utilizado os fatores contribuintes do acidente do EC225 ocorrido na Noruega como estudo de caso, ultima-se que este fenômeno indesejado pode-se originar de várias formas, desde a própria fabricação da peça, pois com imperfeições no seu acabamento proporciona um ponto de concentração de tensão, e até por outros fatores externos.

Analizamos também que a utilização adequada de técnicas de análise de falhas que se aplicam a problemas que ocorrem no ambiente fabril levam a redução de indisponibilidade de itens, com uma melhora da confiabilidade.

Sobre as diretrizes de manutenção determinadas pelos órgãos responsáveis, foram apresentadas as diversas medidas em relação aos fatores contribuintes detectados como: diminuição do ciclo de vida dos componentes envolvidos, substituição do plugue magnético por um de maior desempenho, aumento da frequência das inspeções, mudança no critério de rejeição da CTP, assim como o seu monitoramento proativo.

Na verificação de possibilidades de melhoria no processo de manutenção e operação da aeronave, foi identificado por meio de observação participante junto ao 4º Batalhão de Aviação do Exército sediado em Manaus – AM, que suas aeronaves

EC225 (H225M) durante as missões nas quais não pernoitam em sua sede, e cujos lugares não possuem conexão com a internet, tem como consequência a descontinuidade na leitura e análise dos dados do cartão PCMCIA do HUMS. Isto é, dados importantíssimos de componentes relevantes e essenciais não são acompanhados, conseqüentemente pode vir a retardar um diagnóstico de falhas.

Essa questão poderia ser solucionada com disponibilização de dispositivos portáteis de leitura do cartão PCMCIA do HUMS que acompanharia a aeronave em todos os seus deslocamentos, e/ou com a transmissão de dados via satélite para as unidades de análise que ficam em sede.

O estudo da engenharia de materiais é uma temática complexa, sendo assim o estudo desse trabalho delimitou-se no estudo da falha por fadiga mecânica, o que proporcionou ao acadêmico agregar um grande acréscimo de conhecimento como também uma visão técnico profissional abrangente em relação a esse ramo da engenharia mecânica. Afinal esse estudo certifica e reitera que as falhas podem e devem ser prevenidas ou controladas com a utilização de técnicas adequadas.

O engenheiro deve ser esmerar em busca de soluções, podendo ser por meios de caminhos técnicos alternativos que não seja a inviabilização de um projeto já finalizado, pois nem sempre será economicamente viável.

Para ratificar isso foi apresentado o estudo de caso do acidente com helicóptero na qual após o acidente foi realizado uma minuciosa investigação técnica e novas adequações de manutenção com o intuito de mitigar o ocorrido, com isso garantiu o retorno ao serviço, sem condenar o projeto inicial.

Ao constatarmos hoje que o modelo de helicóptero EC225 acumula após o retorno ao serviço milhares de horas de voo em todo mundo, sem nenhum relato de acidente. Podemos nos inteirar que as ações foram validas e serve de grande exemplo, e que nós do corpo técnico de mecânica podemos utilizá-lo em outros campos da engenharia devido a abrangência diversa do assunto e a aplicabilidade de seu contexto no mercado de trabalho.

Como sugestões para trabalhos futuros têm-se:

- ✓ Estudo da previsão da redução da vida útil e da resistência à fadiga como consequência de pequenos danos superficiais;
- ✓ Análise da árvore de falhas: aplicação na gestão da manutenção;
- ✓ Ensaio de vibrações mecânicas aplicadas à detecção de falhas.

REFERÊNCIAS

AIBN. **The Accident with EC225**, 2018. Disponível em: NSIA Norwegian Safety Investigation Authority <https://www.nsia.no/Aviation/Published-reports/2018-04>. Acesso em: 11 de abr. 2022.

AIRBUS. **Airbus Helicopters Naming Convention**, 2015. Disponível em: <<https://www.airbus.com/en/products-services/helicopters/civil-helicopters/h225/h225-technical-information>>. Acesso em: 25 mai. 2022.

AIRBUS. **H225**. Disponível em: <<https://www.airbus.com/en/products-services/helicopters/civil-helicopters/h225>>. Acesso em: 17 mai. 2022.

ARAUJO, Eduardo. **Ensaio de Fadiga: como prevenir e eliminar problemas de fadiga em campo**. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/ensaio-de-fadiga-como-prevenir-e-eliminar-problemas-de-fadiga-em-campo/>>. Acesso em: 28 abr. 2022.

ALMEIDA, Júlio C. **Projeto Mecânico - Enfoque Baseado na Fadiga e na Mecânica da Fratura**. [Rio de Janeiro]: Grupo GEN, 2018. 9788595153004. Disponível em: <https://grupogen.vitalsource.com/#/>. Acesso em: 19 mar. 2022.

ASKELAND, Donald; WRIGHT, Wendelin. **Ciência e engenharia dos materiais**. 2 ed. [s.l.]: Cengage Learning, 2014.

AZEVEDO, Rogério Cabral; ENSSLIN, Leonardo. **Metodologia da Pesquisa para Engenharias**. 1 ed. Belo Horizonte: CEFET-MG, 2020.

BEER, Ferdinand P. et al. **Mecânica dos Materiais**. 8 ed. [S.l.]: McGraw-Hill Brasil, 2021.

BOTELHO, Luiz Fernando Alves. **Análise geral de falhas por fadiga**. Disponível em: <http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/ea000753.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa. **GTE recebe moderno helicóptero para transporte da Presidência da República**. 18 de jul. de 2012. Disponível em: <<https://www.gov.br/defesa/pt-br/centrais-de-conteudo/noticias/ultimas-noticias/18072012-defesa-gte-recebe-moderno-helicoptero-para-transporte-da-presidencia-da-republica>>. Acesso em: 2 mai. 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa. Força Aérea Brasileira. **Simulador dos helicópteros H225 e H225M será inaugurado nesta sexta (21) no RJ**. 20 de ago. de 2015. Disponível em: < <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/22749/TECNOLOGIA---Simulador-dos-helic%C3%B3pteros-H225-e-H225M-ser%C3%A1-inaugurado-nesta-sexta-%2821%29-no-RJ> >. Acesso em: 4 abr. 2022.

BRITO, Davi. **4º BAvEx - Batalhão Coronel Ricardo Pavanello**. Manaus, 24 de jan. de 2019. Disponível em:

<http://www.spotter.com.br/esquadroes/4bavex_03.htm>. Acesso em: 2 mai. 2022.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETH, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10 ed. [s.n.]: AMGH, 2016.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

EC225. T1: **Manual para Mecânicos**. 2015.

EC225. T2: **Training Manual**. 2018.

ENSUS ADVANCED ENGINNERING. **Fadiga - A principal causa raiz das falhas mecânicas**, 2016. Disponível em: <http://ensus.com.br/fadiga/>. Acesso em: 19 de março de 2022.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projeto de Pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HELIBRAS. **HELIBRAS NO AR**. Itajubá; n. 43, abr. 2015. p. 3-3. Disponível em: <https://www.helibras.com.br/website/docs_wsw/RUB_42/press_198/helibrasnoar43_web.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2022

LIMA, Alex Gutierrez de; CUNHA, Kayan Alcântara da Silva; CARVALHO, Matheus Costa; et al. **Fadiga em componentes mecânicos: estudo para redução de perdas econômicas e de vidas**. In: SIMPÓSIO DE EXCELENCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA. XV, 2018, Resende. **Artigo** Resende: AEDB, 2018. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos18/23226187.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2022.

LIMA, Telma Cristiane S. de; MIOTO, Regina Célia Tamaso. **Procedimentos metodológicos na construção do conhecimento científico: a pesquisa bibliográfica**. **Revista katálysis**. Florianópolis; v. 10, set. 2007. p. 37-45. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rk/a/HSF5Ns7dkTNjQVpRyvhc8RR/?lang=pt>>. Acesso em: 29 abr. 2022.

MARTINS, Giovani. **Análise experimental de fadiga mecânica em placas de trocadores de calor casco e placas**. Editora Dialética, 2022.

MELCONIAN, Sarkis. **Mecânica Técnica e Resistência dos Materiais**. 20 ed. São Paulo: Érica, 2012.

MILANI, Carlos. **Falhas em ligas metálicas**. 2019. Disponível em: <<http://www.metalurgistaindustrial.com.br/artigos.asp?tipo=E>>. Acesso em: 25 abr. 2022.

NORTON, ROBERT L. **Projeto de Máquinas, uma abordagem integrada**. 4ª Ed. São Paulo: Bookman, 2004.

PESSANHA, Carlos Eduardo Nunes. **O M'ARMS e a Manutenção Preditiva – uma ferramenta valiosa para a segurança de voo**. **REVISTA DA AVIAÇÃO NAVAL**. Rio

de Janeiro; v. 47, n. 77, abr. 2022. P. 22-25. Disponível em: <<https://www.portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/aviacaonaval/article/view/2773/2668>>. Acesso em: 5 jun 2022.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2 ed. Nova Hamburgo: Feevale, 2013.

ROSA, Edson da. **Análise de Resistência Mecânica (Mecânica da Fratura e Fadiga)** Grupo de Análise e Projeto Mecânico, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina 2002.

SCHEKIERA, Acácio Antônio. **Engenharia Mecânica Manutenção Inspeção**. 1 ed. [S.l.]: Clube de Autores, 2011.

SCHÖN, Claudio Geraldo - **Fadiga e Mecânica da Fratura 2**. USP 2020. Disponível em: <<https://eaulas.usp.br/portal/video?itemId=20391>>. Acesso em: 14 abr. 2022.

SILVA, Maria Cecília Pontes. **Contribuição para a elaboração de práticas laboratoriais para o ensino-aprendizagem de fadiga e mecânica da fratura**. 2019. 56 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/26582/1/ContribuicaoElaboracaoPraticas.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2022.

SMITH, Willian F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos da Engenharia e Ciência Dos Materiais**. 5 ed. Porto Alegre: McGraw, 2010.

TRONCO, Luiz Fernando. **Desenvolvimento de procedimentos para a realização de ensaio de fadiga por flexão-rotativa e obtenção da vida em fadiga da Liga AA6063-T6**. 2016. 96 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Curso de Engenharia Mecânica)-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

VIEIRA, José Guilherme Silva. **Metodologia de pesquisa científica na prática**. Curitiba: Fael, 2011.

ZOLIN, Ivan. **Curso técnico em automação industrial: ensaios mecânicos e análises de falhas**. 3 ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.