

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DA FALHA DAS ENGRENAGENS DO
REDUTOR DE VELOCIDADE EM ESCAVADEIRAS DE GRANDE PORTE**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

TIAGO SOARES DA SILVA

RIO GRANDE, RS

2022

TIAGO SOARES DA SILVA

**ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DA FALHA DAS ENGRENAGENS DO
REDUTOR DE VELOCIDADE EM ESCAVADEIRAS DE GRANDE PORTE**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Caracterização de material: Análise de falha

Orientador: Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl

RIO GRANDE, RS

2022

Ficha Catalográfica

S586a Silva, Tiago Soares da.

Análise e caracterização da falha das engrenagens do redutor de velocidade em escavadeiras de grande porte / Tiago Soares da Silva. – 2022.

56 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2022.

Orientador: Dr. Luciano Volcanoglo Biehl.

1. Redutores de velocidade 2. Fratura de dentes de engrenagem
3. Análise de vibração 4. Caracterização de material I. Biehl, Luciano Volcanoglo II. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº **12/2022** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos trinta dias do mês de agosto de dois mil e vinte e dois, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às dez horas, online via webconferência, a que se submeteu o mestrando **Tiago Soares da Silva**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de soldagem e materiais, com o seguinte título: **ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DA FALHA DAS ENGRENAGENS DO REDUTOR DE VELOCIDADE EM ESCAVADEIRAS DE GRANDE PORTE**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Luciano Volcanoglo Biehl, Jorge Luis Braz Medeiros e José de Souza, sob a presidência do Professor Luciano Volcanoglo Biehl. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Luciano Volcanoglo Biehl: APROVADO
2. Jorge Luis Braz Medeiros: APROVADO
3. Jose de Souza: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. _____

CPF: 575.195.100-00

Documento assinado digitalmente
 Luciano Volcanoglo Biehl
 Data: 16/08/2022 10:33:48-0300
 Verifique em <https://verificador.id.br>

2. _____

CPF: 588.871.210-87

Documento assinado digitalmente
 JORGE LUIS BRAZ MEDEIROS
 Data: 30/08/2022 10:47:38-0300
 Verifique em <https://verificador.id.br>

3. _____

CPF: 914.626.140-00

Documento assinado digitalmente
 JOSE DE SOUZA
 Data: 16/08/2022 10:56:23-0300
 Verifique em <https://verificador.id.br>

Documento assinado digitalmente
 TIAGO SOARES DA SILVA
 Data: 16/08/2022 12:27:38-0300
 Verifique em <https://verificador.id.br>

Tiago Soares Da Silva: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Adriana, a meu filho João Lucas, as minhas filhas Maria Letícia e Maria Isabel, a minha mãe Francisca das Chagas e a meu pai Djairo Soares, que sempre acreditaram no meu potencial e foram as minhas fontes de inspiração em todos os momentos de aprendizado e desafios.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus pela dádiva da vida e por me dar discernimento, força e coragem nos momentos difíceis para finalizar esta obra.

A minha esposa, filho e filhas, por me apoiarem e serem meu catalizador para se desenvolver como pessoa e profissionalmente.

Aos meus pais, Francisca das Chagas e Djairo Soares, pelo companheirismo e conselhos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl, pelo apoio e por acreditar que este projeto poderia ser concluído. Além disso e mais importante, pelo empenho, dedicação e incentivos prestados ao longo desses anos.

A todos os colegas e amigos, em especial a José Cleber, por sempre me incentivar e apoiar durante a elaboração dessa obra.

À FURG, pela oportunidade e honra concedida a mim, para finalizar o mestrado em Engenharia Mecânica.

RESUMO

As escavadeiras de grande porte, utilizadas na produção de larga escala na mineração, são equipamentos compostos por caixas redutoras de velocidades responsáveis por transferir energia mecânica em movimentos de elevação e escavação dos implementos. Este trabalho foi desenvolvido em consequência das falhas ocorridas nos dentes de engrenagem do redutor de elevação daqueles equipamentos, essas falhas causaram paradas excessivas e custos elevados de manutenções. Com a ruptura dos dentes, foi possível realizar as análises macroscópicas e microscópica da superfície de fratura, sendo possível identificar os modos de falha desse dispositivo. Na análise microscópica, óptico e Eletrônico de Varredura, foi possível identificar a microestrutura presente no material base e na região de tratamento superficial, além de observar o comportamento microestrutural na fratura, identificando nucleações múltiplas, estrias e propagações de trincas. Foi realizado uma análise química do material para identificação de sua classe, além disso, foi realizado o ensaio de dureza, na escala HRC, e desenhado o seu perfil entre a superfície e o núcleo do dente. As análises de campo, constataram que as vibrações do equipamento, durante a sua operação, continham divergências entre os valores mínimos, máximos e toleráveis, capazes de contribuir com a ruptura do dente do redutor. Ao fim de toda a análise, constatou-se que a análise química estava dentro do especificado, além disso, que a vibração estava acima do tolerável pelo componente.

Palavras-chave: Redutores de velocidade, Fratura de dentes de engrenagem, Análise de vibração, Caracterização de material.

ABSTRACT

Large excavators, used in large-scale production in mining, are equipment composed of gearboxes responsible for transferring mechanical energy in lifting and digging movements of the implements. This work was developed as a result of failures in the gear teeth of the hoisting gear of those equipment, these failures caused excessive stops and high maintenance costs. With the breakage of the teeth, it was possible to perform the macroscopic and microscopic analysis of the fracture surface, being possible to identify the failure modes of this device. In the microscopic, optical and Electronic Scanning analysis, it was possible to identify the microstructure present in the base material and in the surface treatment region, in addition to observing the microstructural behavior in the fracture, identifying multiple nucleations, striations and crack propagation. A chemical analysis of the material was carried out to identify its class, in addition, the hardness test was carried out, on the HRC scale, and its profile was drawn between the surface and the core of the tooth. The field analysis found that the vibrations of the equipment, during its operation, contained divergences between the minimum, maximum and tolerable values, capable of contributing to the breakage of the gear reducer tooth. At the end of the entire analysis, it was found that the chemical analysis was within the specified, in addition, that the vibration was above the tolerable component.

Keywords: Speed reducers, Gear teeth fracture, Vibration analysis, Material characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Estrutura de um redutor planetário.....	20
Figura 02: (a) Engrenagem reta; (b) Engrenagem helicoidal; (c) Engrenagem cônica.....	21
Figura 03: (a) Conjunto de engrenagens reta; (b) Especificação de um dente de engrenagem.....	22
Figura 04: Grupos de materiais para fabricação de engrenagens.....	23
Figura 05: Padrão para tratamento térmico por chama em engrenagens.....	30
Figura 06: Redutor de levação da escavadeira 7495HR com a tampa aberta e evidenciado a fratura dos dentes da engrenagem de entrada.....	34
Figura 07: Pontos de monitoramento/coleta de vibração do redutor de levação.....	38
Figura 08: Parâmetros de vibração do redutor de elevação.....	39
Figura 09: (a) Engrenagem intermediária do redutor sem a presença de deformação plástica; (b) Engrenagem de entrada apresentando fratura do dente.....	41
Figura 10: Fratura do dente com evidência de pequenas marcas de praia, onde demonstra que o componente teve fadiga, ruptura por baixo ciclo.....	42
Figura 11: Ensaio magnético no dente da engrenagem, mostrando que a trinca inicia-se no pé do dente e se propaga até ser arrancado.....	42
Figura 12: Aspecto macroestrutural do material mostrando a camada endurecida superficialmente e material base.....	43
Figura 13: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do dente da engrenagem fraturado, (a) Estrias de fadiga no pé do dente; (b) Cavidade na superfície do dente.....	44
Figura 14: Microscópio Óptico, apresentando microestrutura Bainita na região de interface entre superfície tratada e material base.....	44
Figura 15: Microscópio Óptico, apresentando microestrutura de Martensita revenida no material base.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Principais tipos de aço para cementação.....	27
Tabela 02: Aços vs dureza alcançada através da nitretação a gás.....	28
Tabela 03: Teores de carbono para tratamento por têmpera.....	30
Tabela 04: Composição química dos dentes fraturados do eixo pinhão.....	46
Tabela 05: Composição química dos dentes fraturados do eixo pinhão.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS

PGTs - Trens de engrenagens planetárias;

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração;

PPA – Poliftalamida;

PEI – Polietierimida;

PEEK – Polietere tercetona;

LCPs - Polímeros de cristal líquido;

PTFE – Politetrafluoretileno;

CST – Corrosão sob tensão;

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura;

V – Velocidade;

V₀ - Velocidade inicial;

V_f - Velocidade final.

LISTA DE GRÁFICOS E FLUXOS

Fluxo 01: Árvore de análise de falha do redutor de elevação.....	33
Gráfico 01: Histórico de vibração do redutor de elevação.....	40
Gráfico 02: Ensaio de dureza realizado no dente da engrenagem.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS GERAIS.....	17
3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
4.1	CAIXA DE ENGRENAGEM REDUTORA	18
4.2	ENGRENAGENS	20
4.3	TIPOS DE MATERIAL PARA FABRICAÇÃO DE ENGRENAGENS	22
4.4	TIPOS DE TRATAMENTO TÉRMICO PARA ENGRENAGENS.....	24
4.4.1	AÇOS PARA CEMENTAÇÃO.....	26
4.4.2	AÇOS PARA BENEFICIADOS (TEMPERADO E REVENIDO).....	27
4.4.3	AÇOS NITRETADOS COM LÍQUIDO	27
4.4.4	AÇOS NITRETADOS COM GÁS	28
4.4.5	AÇOS TRATADOS POR INDUÇÃO.....	28
4.4.6	AÇOS TRATADOS POR CHAMA	29
4.5	DUREZA EM MATERIAIS	30
4.6	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.....	31
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
5.1	MATERIAIS	32
5.2	MÉTODOS.....	32
5.2.1	ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA NA MANUTEÇÃO	32
5.2.2	MODOS DE FALHA DE MANUTEÇÃO	33
5.2.3	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.....	34
5.2.4	ANÁLISE MACROSCÓPICA	35
5.2.5	ANÁLISE MICROSCÓPICA.....	35
5.2.6	ANÁLISE QUÍMICA	36
5.2.7	ENSAIO DE DUREZA.....	36
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	37
6.1	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.....	37
6.2	COLETA DE DADOS DE VIBRAÇÃO.....	37
6.3	ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO NO MATERIAL	40

6.4	IDENTIFICAÇÃO DE MARCAS DE PRAIA	41
6.5	IDENTIFICAÇÃO DA MICROESTRUTURA.....	43
6.6	ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL.....	45
6.7	DUREZA DO MATERIAL	46
7	CONCLUSÕES.....	48
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	50
9	REFERÊNCIAS	51
9.1	REFERÊNCIAS NOMINAIS	51
9.2	REFERÊNCIA POR ESTRATO	55
9.3	REFERÊNCIA POR QUALIS.....	56
9.4	REFERÊNCIA POR DATA DOS ARTIGOS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Durante muitos anos a prática da exploração mineral vem se desenvolvendo cada vez mais, sendo necessário inserir equipamentos modernos e robustos para a realização daquelas atividades. No Brasil, diferentes regiões contêm diversos tipos de minério, seja ele ferro, cobre, níquel, ouro, entre outros. O maior destaque vem sendo o minério de ferro, onde ocorre a sua maior exploração, conseqüentemente o maior volume exportado, na qual podemos destacar a região norte com uma maior parcela daquele produto.

O estado do Pará, situado naquela região, é um dos maiores estados do país quando falamos em extensão territorial, com mais de um milhão de quilômetros quadrados, contendo as maiores jazidas de minério do país. Segundo dados do 8º Anuário Mineral do Pará de 2018, último anuário registrado, em 2018 foram registrados uma movimentação financeira de US\$ 13,7 bilhões em minério, um aumento de 7,6% quando comparado com o ano anterior, representando cerca de 88% do total de exportações do estado, onde o minério de ferro foi responsável por US\$ 9,1 bilhões.

Para que ocorra a extração daquele minério, as mineradoras utilizam grandes equipamentos, na qual possuem elevado poder produtivo, nesse caso podemos citar as escavadeiras. Nas mineradoras de maior produção mineral, são utilizadas escavadeiras que contêm cabos de aço de elevada resistência mecânica em seu implemento, que possibilita uma maior capacidade produtiva, cerca de 7.000 toneladas por hora.

No estado do Pará, existem diversas mineradoras que utilizam daqueles equipamentos para a sua produção. Esses ativos são capazes de carregar de uma única vez 109 toneladas, mas para que tudo isso possa ocorrer, é necessário que alguns sistemas estejam 100% operante, na qual são compostos por elevação, escavação, giro e locomoção. Cada um desses sistemas, são compostos por motores elétricos e redutores, capazes de transformar energia elétrica em energia mecânica.

Durante a operação dessas escavadeiras, o sistema de elevação, vem apresentando falhas catastróficas, mais precisamente no redutor de velocidade, causando fraturas em suas engrenagens, na qual impossibilita a operação do

equipamento por um período prolongado. A anomalia causada no redutor se deve ao elevado índice de vibração no seu conjunto de engrenagens.

Para Oliveira, S.F.P.S. 2103, as caixas de engrenagens é um invólucro fechado, contendo no seu interior um conjunto de engrenagens. Estão disponíveis numa ampla gama de tamanhos, capacidades e relações de velocidade. Segundo LIANG et al., 2018, A caixa de engrenagens é amplamente utilizada em aplicações industriais e militares. Devido à alta carga de serviço, condições operacionais adversas ou fadiga, podem ocorrer falhas nas engrenagens. Se essas anomalias não puderem ser detectadas precocemente, pode ocorrer grandes perdas econômicas ou até mesmo uma catástrofe.

Segundo Shuklan A.K. et al (2013), a falha pode levar a sérias consequências, como enormes perdas financeiras, contaminação ambiental e até mesmo perda de vidas. No caso de uma falha, portanto, é essencial investigar a causa raiz da falha em termos de projeto, qualidade do material e procedimento de fabricação. Esta investigação trata principalmente das prováveis causas de danos em serviço.

Para Fagundes L.D. 2006, a falha representa um conceito fundamental para a análise de confiabilidade, sendo a falha definida como sendo o término da habilidade de um item para o desempenho de uma requerida função.

Segundo Baydar N, 2003, a análise de vibração é amplamente utilizada em diagnóstico de máquinas nas aplicações de monitoramento da condição. Sendo através dos sinais de vibração, a detecção das várias falhas em caixas de engrenagens.

Desta forma, entendemos que para que um equipamento de mineração possa obter uma excelente produtividade, é necessário que seus sistemas tenham uma boa confiabilidade. Para isso, deve se haver uma boa caracterização e especificação dos materiais referente aos componentes de maior responsabilidade e garantir uma boa análise de vibração, além de seu acompanhamento durante as suas atividades.

2 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste estudo, é identificar as possíveis falhas dos dentes de engrenagem do redutor de elevação das escavadeiras de grande porte utilizada na mineração, que culminou em quebras prematuras, através da caracterização do material, otimização dos dados de vibração e análise de campo.

3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o que foi proposto no objetivo geral, foi necessário estabelecer alguns objetivos específicos, como:

- Analisar, de forma macroscópica, a região de fratura do dente;
- Analisar a fratura através de microscópio óptico e Eletrônico de Varredura;
- Realização de análise química do material estudado;
- Traçar perfil de dureza do material entre a superfície e núcleo;
- Elaborar rota de análise vibração do componente em campo;
- Estabelecer pontos de monitoramento de vibração no redutor, identificando os níveis mínimos, máximos e aceitáveis durante a operação.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 CAIXA DE ENGRENAGEM REDUTORA

Segundo Zhu J (2020), as caixas de engrenagens planetárias têm grande capacidade de transmissão de potência em uma estrutura compacta, pequeno volume, peso leve, grande relação de transmissão e alta eficiência de transmissão. Portanto, eles ocupam a posição principal no campo da produção industrial e da engenharia, como turbinas eólicas, helicópteros, máquinas de construção e outros tipos de sistemas de transmissão.

Para Chouksey M. et al (2016), as caixas de engrenagens são um dos componentes de transmissão de potência mais críticos e amplamente utilizados em aplicações industriais. O desempenho da engrenagem depende principalmente da durabilidade da superfície do dente da engrenagem.

Segundo Del Castillo M (2002), os trens de engrenagens planetárias (PGTs) oferecem a possibilidade de atingir uma determinada relação de velocidade com um peso e tamanho menores do que seria necessário com um trem de engrenagens comum. Desta forma, para Liang X. et al (2018), A caixa de engrenagens é amplamente utilizada em aplicações industriais e militares. Devido à alta carga de serviço, condições operacionais adversas ou fadiga inevitável, podem ocorrer falhas nas engrenagens. Se as falhas da engrenagem não puderem ser detectadas precocemente, a saúde continuará a se degradar, talvez causando grandes perdas econômicas ou até mesmo uma catástrofe. A caixa de engrenagens é amplamente utilizada em aplicações industriais e militares. Devido à alta carga de serviço, condições operacionais adversas ou fadiga inevitável, podem ocorrer falhas nas engrenagens. Se as falhas da engrenagem não puderem ser detectadas precocemente, a saúde continuará a se degradar, talvez causando grandes perdas econômicas ou até mesmo uma catástrofe.

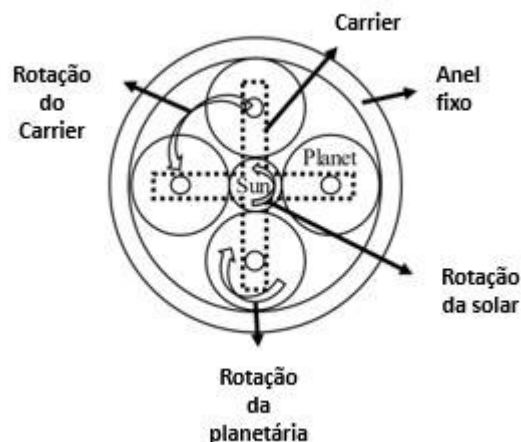
Segundo Li X. (2022), as transmissões de engrenagens planetárias são amplamente utilizadas em aplicações industriais e militares, como turbina eólica e rotor principal de helicóptero, principalmente porque podem fornecer grande torque e relação de velocidade dentro de um espaço compacto. Como as caixas de engrenagens planetárias geralmente trabalham sob carga pesada e condições difíceis, as engrenagens são propensas a falhas, resultando em corrosão dos

dentes, fragmentação e até rachaduras. As falhas podem induzir ainda mais o desligamento ou mesmo a catástrofe, o que causa perdas econômicas ou incidentes de segurança.

Para Delgado-Pietro M. et al (2022), As transmissões de engrenagens planetárias (PGT's) são amplamente utilizadas como elementos mecânicos na indústria automotiva, aeronáutica, geração de energia eólica, etc. Geralmente, esses mecanismos são responsáveis por utilizar a potência necessária fornecida pelos motores para executar as funções associadas a cada aplicação, além disso, Um conjunto de engrenagens planetárias, figura 01, é um sistema que consiste em uma ou mais engrenagens externas ou planetas que giram em uma engrenagem central ou sol. Os planetas são montados em uma estrutura chamada transportadora que pode girar em relação aos planetas e ao sol com uma engrenagem externa estacionária chamada anel para que os planetas se encaixem neles.

Segundo Chen X. et al (2021), as caixas de engrenagens planetárias são componentes importantes em muitas aplicações, como automóveis, máquinas de mineração e turbinas eólicas. A regra principal do redutor planetário é aumentar ou reduzir a velocidade de entrada. Por exemplo, a transmissão usa caixas de engrenagens planetárias para alterar a velocidade dos carros. A Figura 1 mostra o esquema de um redutor planetário com quatro engrenagens planetárias. De acordo com a estrutura complicada, os redutores planetários têm grande capacidade de carga e são amplamente utilizados em um ambiente de alta carga. Embora bem projetados, vários modos de falha, como falhas de engrenagem em redutores, podem destruir os redutores planetários. Se não houver detecção precoce, essas falhas podem causar grandes perdas econômicas ou catástrofes.

Figura 01: Estrutura de um redutor planetário.



Fonte: Chen X. et al (2021).

4.2 ENGRENAGENS

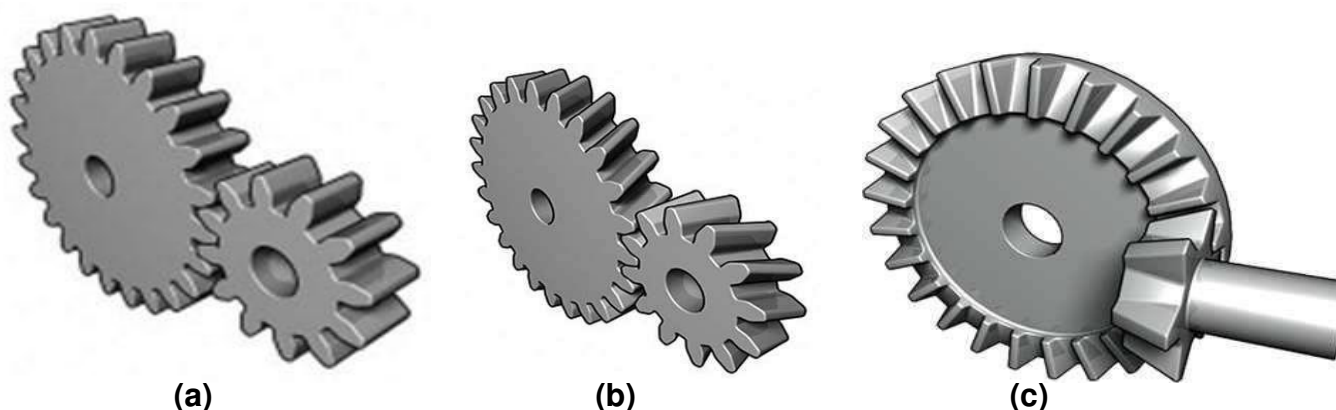
Para Garcia N.G. (2018), Engrenagens são importantes elementos de máquinas usados na transmissão de movimento rotativo e torque entre eixos, as quais são basicamente cilindros dentados projetados para que não haja travamento ou perda de contato entre os dentes. O termo engrenagem se refere ao conjunto de pelo menos duas rodas dentadas – uma motora e a outra movida – as quais servem como um tipo de alavanca. No caso de um mesmo valor de potência, engrenagens podem ser projetadas de forma que haja ganho de torque ou ganho de velocidade.

Segundo Petrescu R.V.V. (2017), as engrenagens são hoje as transmissões mecânicas mais difundidas e utilizadas em todo o mundo. Devem ser fabricadas em escala industrial, em todos os lugares e ter uma variedade de usos, sendo de extrema importância tanto para as máquinas pesadas de prédios industriais, quanto para eletrodomésticos, eletroeletrônicos, etc. enorme (usado desde navios, máquinas pesadas ou em energia), mas também para os relógios de ferramentas, ou para dispositivos de tamanhos micro.

Para Melconian S., denomina-se engrenagem a peça de formato cilíndrico (engrenagem cilíndrica), cônico (engrenagem cônica) ou reto (cremalheira), dotada de dentadura externa e interna, cuja a finalidade é transmitir movimento

sem deslizamento e potência, multiplicando os esforços com a finalidade de gerar trabalho.

Figura 02: (a) Engrenagem reta; (b) Engrenagem helicoidal; (c) Engrenagem cônica.



Fonte: Petrescu R.V.V, 2017.

Segundo Padoin E. (2011), engrenagens são rodas com dentes padronizados que servem para transmitir movimento e força entre dois eixos. Muitas vezes as engrenagens são usadas para variar o número de rotações e o sentido da rotação de um eixo para o outro.

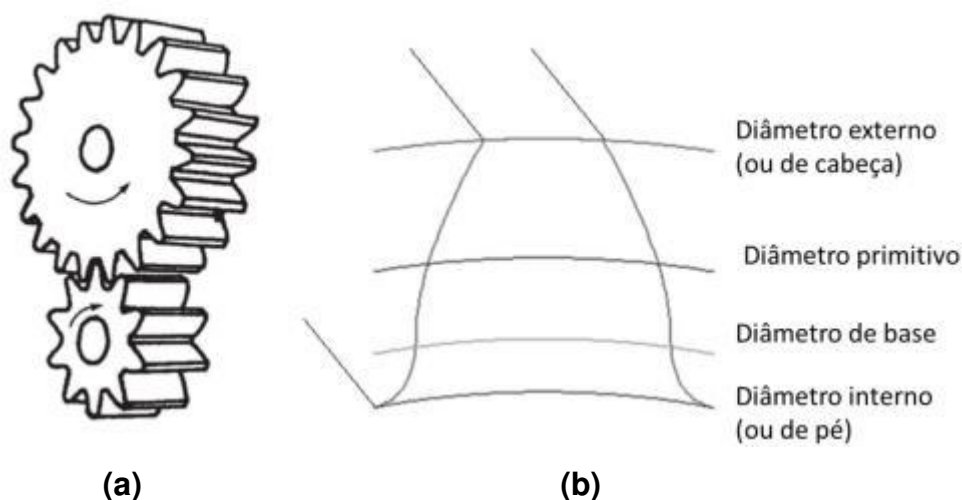
Para Tayer P.D.N. (2018), engrenagens são rodas dentadas usadas para transmissão de movimento rotativo de um eixo para o outro e para mudança na velocidade de rotação.

Radhakrishnan S. (2019), disse que Engrenagens têm uma função crítica em uma máquina rotativa. Assim como os rolamentos, as engrenagens operam em condições operacionais difíceis envolvendo forças estáticas e de impacto. As engrenagens estão sujeitas a desgaste na forma de rachaduras, corrosão e escamação, que eventualmente culminam em um dente lascado ou dente quebrado. Quando esse estado de falha é atingido, as engrenagens não funcionam como esperado e, portanto, elas, como os rolamentos, devem ser monitoradas continuamente quanto à sua condição de saúde.

Para Tayer P.D.N. (2018), as engrenagens são fabricadas utilizando referências para definir a sua geometria. Sendo os diâmetros externo e interno

(cabeça e pé, respectivamente) definem os limites superiores e inferiores do dente, enquanto o diâmetro primitivo é definido como o círculo de rolamento da engrenagem, em outras palavras, duas engrenagens podem ser consideradas como dois cilindros em contato com diâmetros iguais aos diâmetros primitivos destas.

Figura 03: (a) Conjunto de engrenagens reta; (b) Especificação de um dente de engrenagem.



Fonte: Tayer P.D.N. (2018).

4.3 TIPOS DE MATERIAL PARA FABRICAÇÃO DE ENGRENAGENS

Para Chatterjee P., Chakraborty S. (2012), O papel dos materiais no processo de projeto de engenharia já foi bem reconhecido. A escolha de um material apropriado para um determinado produto é uma das tarefas críticas para os projetistas.

Segundo Mazzano N. (2013), em redutores de velocidades, os critérios de escolha para as engrenagens são a força e o desgaste. Nesse caso, os materiais devem possuir uma resistência adequada às solicitações e propriedades que evitam um desgaste prematuro. Entretanto, esses critérios não são suficientes para uma boa escolha. Há casos em que a aplicação está vulnerável à corrosão ou o peso do conjunto é relevante. Como as aplicações variam, variam também as condições a serem satisfeitas. Os materiais para a fabricação de engrenagens podem ser de dois tipos: Metálicos e não metálicos.

Figura 04: Grupos de materiais para fabricação de engrenagens.

NÃO METÁLICOS	METÁLICOS
● Plásticos - Termoplástico - Nylon - Acetal - Policarbonato - Poliéster - Polietileno - Poliuretano - Elastômero poliéster ● Tecidos duros - Celoron	● Ferro ● Aço carbono ● Aço ligado ● Bronze ● Alumínio ● Sinterizado

Fonte: Mazzo N. (2013).

Para as engrenagens poliméricas, segundo Mazzano N. (2013), essas engrenagens possuem uma capacidade de carga um pouco maior que as moldadas. As fabricadas com tecidos duros devem, necessariamente, partir de chapa. A barra não é recomendável por causa da direção das fibras, que tornam seus dentes frágeis em relação à flexão.

Kapelevich A. (2020), disse que a seleção de polímeros de engrenagem é acionada principalmente pela capacidade de carga, vida útil e condições de operação do acionamento de engrenagem necessários (temperatura e umidade, por exemplo). Outras considerações podem incluir o custo, peso, ruído e vibração, proibição de lubrificação externa, além disso, Mazzano N (2013), disse que a resistência a corrosão, peso sete vezes menor que o aço, baixa inércia, compatibilidade com os lubrificantes comerciais comuns, baixo nível de ruídos, proteção contra sobrecargas (atuando como fusível), baixa manutenção, são as principais vantagens das engrenagens poliméricas.

Para Kapelevich A. (2020), os principais materiais de engrenagens poliméricas são: acetais (POM) e nylons, poliésteres e policarbonatos. Eles podem ser usados com temperaturas de operação de até 150°C. Para temperaturas elevadas (<170°C), os polímeros de engrenagem adequados são poliftalamida (PPA), nylon 46 e materiais plásticos semelhantes de alta temperatura (<200°C), incluindo

polieterimida (PEI), polieteretercetona (PEEK) e polímeros de cristal líquido (LCPs).

Algumas desvantagens podem ser encontradas em engrenagens fabricadas através de polímeros. Para Mazzano N. (2013), as principais limitações são:

- Baixa resistência em comparação com os materiais metálicos, principalmente o aço;
- Absorção de líquidos em ambientes quentes (efeito esponja). Esse fenômeno altera o tamanho e a resistência das engrenagens, principalmente quando não há nenhum tratamento pré-esponjamento;
- Precisão de transmissão. Os dentados das rodas fabricadas com resinas não podem ser acabados nos equipamentos tradicionalmente utilizados para as rodas dentadas feitas de metal como, por exemplo, as retificadoras e as rasqueteadoras (shaving).

Contudo para Kapelevich A. (2020), as desvantagens das propriedades dos plásticos de engrenagem podem ser mitigadas por aditivos na composição do polímero. Aditivos para maior resistência à flexão incluem fibras de vidro, carbono e aramida (Kevlar). A resistência ao desgaste do flanco do dente de engrenagens plásticas não lubrificadas pode ser aumentada por aditivos antidesgaste e antifricção: silicone, politetrafluoretileno (PTFE), pós de grafite, dissulfeto de molibdênio (MoS₂), etc.

As engrenagens metálicas, como pode ser observado na figura 04, aparecem de diversos tipos de material, onde segundo Mazzano N. (2013), os principais métodos para a preparação daqueles materiais são: fundição, forjamento a quente, forjamento a frio, laminação e estampagem. Desta forma, a utilização do ferro se faz em engrenagens onde a capacidade de carga é irrelevante. Já o aço pode ser utilizado nas engrenagens aplicadas aos equipamentos com maior potência. Tanto o ferro quanto o aço são vulneráveis à porosidade, que, se existir, pode debilitar os dentes.

4.4 TIPOS DE TRATAMENTO TÉRMICO PARA ENGRENAGENS

Para Scurson G.F. (2021), o tratamento térmico é um processo que ocasiona mudanças nas propriedades e características de aços através de

aquecimento e resfriamento controlados. Desse modo, no tratamento térmico convencional (têmpera e revenimento), a quantidade de austenita retida pode ser reduzida devido ao aço temperado que sofrerem múltiplos ciclos revenidos com temperaturas relativamente mais altas por períodos mais longos. No entanto, esse processo tem uma desvantagem inerente, pois leva ao amolecimento excessivo da matriz e espessamento dos carbonetos ocasionando menor dureza e resistência.

Tobie T. Et al (2017), os requisitos gerais para componentes de engrenagem de alto desempenho são uma caixa rígida que fornece resistência à fadiga adequada, bem como resistência ao desgaste e um núcleo resistente que evita falhas frágeis sob cargas de alto impacto. Assim, vários conceitos de ligas, tratamentos termomecânicos e termoquímicos foram desenvolvidos para alcançar esta combinação de propriedades. Comumente, as engrenagens são, portanto, cementadas. Os conceitos de liga para aplicações de engrenagens de médio e grande porte variam significativamente em diferentes mercados devido a fatores históricos (por exemplo, automotivo, construção de máquinas, militar), experiências práticas, bem como a preferência local por certos elementos de liga.

Para Medeiros Braz J.L. Et al (2021), existem diferentes tipos de tratamentos termoquímicos, que são amplamente utilizados pela indústria automotiva, sendo que cada um apresenta as suas vantagens e desvantagens. Os processos mais empregados são os de cementação, carbonitretação e nitretação. Estes podem ser realizados em diferentes atmosferas como líquida, gasosa e plasma.

Segundo Medeiros Braz J.L. Et al (2021), os tratamentos termoquímicos são processos cuja finalidade é obter um endurecimento na superfície dos aços e ao mesmo tempo em que o núcleo permanece tenaz. A combinação de uma superfície endurecida com um núcleo dúctil é favorável para peças como engrenagens, pois o aumento da dureza superficial reduz o desgaste e com o núcleo dúctil é capaz de absorver os esforços durante operações cíclicas. Os tratamentos termoquímicos também são utilizados para aumentar a resistência à corrosão, à fadiga, devido às tensões compressivas e à oxidação em elevadas temperaturas.

Os tratamentos térmicos para as engrenagens dependem de cada aplicação, com isso, segundo Mazzano N. (2013), esses tratamentos podem ser:

- Cementação;
- Beneficiados (temperado e revenido);
- Nitretados com líquido;
- Nitretados com gás;
- Tratados por indução;
- Tratados por chama.

4.4.1 AÇOS PARA CEMENTAÇÃO

Para Mazzano N. (2013), os flancos dos dentes devem ser suficientemente duros, para suportar a pressão gerada pela força, inerente ao trabalho de transmissão, de modo a não sofrer avarias como escoriações, deformações plásticas etc. O núcleo, por sua vez, não pode ser muito duro, para conceder certa flexibilidade ao dente no momento em que um choque brusco e violento ocorrer, minimizando a probabilidade de uma fratura.

Já segundo Tobie T. Et al (2017), o processo de tratamento térmico da cementação é complexo, exigindo um alto nível de conhecimento técnico, bem como um profundo conhecimento das características do material, onde os principais tipos de aços de cementação para engrenagens de médio e grande porte em vários mercados geográficos, podem ser vistos na tabela 01.

Tabela 01: Principais tipos de aço para cementação.

Steel Grade	Standard	Alloy Addition in wt %									Region
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	
20MnCr5	EN 10084 (1.7147)	min.	0.17	-	1.10	-	-	1.00	-	-	Western Europe
		max.	0.22	0.40	1.40	0.035	0.035	1.30	-	-	
18CrNiMo7-6	EN 10084 (1.6587)	min.	0.15	-	0.50	-	-	1.50	0.25	1.40	
		max.	0.21	0.40	0.90	0.025	0.035	1.80	0.35	1.70	
15CrNi6	EN 10084 (1.5919)	min.	0.14	-	0.40	-	-	1.40	-	1.40	France, Germany
		max.	0.19	0.40	0.60	0.035	0.035	1.70	-	1.70	
17NiCrMo6-5	EN 10084 (1.6566)	min.	0.14	-	0.60	-	-	0.80	0.15	1.20	Italy, France
		max.	0.20	0.40	0.90	0.025	0.035	1.10	0.25	1.50	
SAE 8620	SAE J1249	min.	0.18	0.15	0.70	-	-	0.40	0.15	0.40	North America
		max.	0.23	0.35	0.90	0.030	0.040	0.60	0.25	0.70	
SAE 9310	SAE J1249	min.	0.08	0.15	0.45	-	-	1.00	0.08	3.00	
		max.	0.13	0.35	0.65	0.025	0.040	1.40	0.15	3.50	
20CrMnTi	GB T 3077-1999	min.	0.17	0.17	0.80	-	-	1.00	0.00	-	China
		max.	0.23	0.37	1.10	0.035	0.035	1.30	0.15	0.30	
20CrMnMo	GB T 3077-1999	min.	0.17	0.17	0.90	-	-	1.10	0.20	-	
		max.	0.23	0.37	1.20	0.025	0.035	1.40	0.30	0.30	
SCM420	JIS	min.	0.18	0.15	0.60	-	-	0.90	0.15	-	Japan
		max.	0.23	0.35	0.85	0.030	0.030	1.20	0.30	-	

Fonte: Tobie T. Et al (2017).

4.4.2 AÇOS PARA BENEFICIADOS (TEMPERADO E REVENIDO)

Para Mazzano N. (2013), os aços beneficiados, ou seja, temperados e revenidos, são recomendados para aplicações em que a pressão nos flancos não seja muito alta. É comum especificar um beneficiamento para dureza entre 35 e 38 Rc para que se permita fresar os dentes após o tratamento térmico. Nesse caso, os problemas de deformação deixarão de existir.

4.4.3 AÇOS NITRETADOS COM LÍQUIDO

Segundo Mazzano N. (2013), os aços nitretados com líquido são recomendados para peças que necessitam de dureza superficial, mas que são fortemente vulneráveis às deformações de têmpera. Esse processo, praticamente, não deforma a peça, pelo fato de não haver choque térmico no processo, porém limita muito a profundidade da camada endurecida, que não passa de alguns centésimos de milímetro.

Para Zhang X. Et al (2018), a baixa temperatura de nitretação líquida nos aços inoxidáveis, pode resultar na formação de uma zona superficial da chamada austenita expandida (fase S), isso ocorre devido a dissolução de grandes quantidades de nitrogênio na solução sólida e formação de uma camada supersaturada livre de precipitado com alta dureza.

4.4.4 AÇOS NITRETADOS COM GÁS

Segundo Mazzano N. (2013), os aços nitretados com gás, são recomendados para peças cujas características sejam idênticas às anteriores. A diferença é que a nitretação a gás proporciona uma profundidade bem maior da camada endurecida, podendo alcançar até 0,7 mm. Já a dureza, dependendo do material utilizado, pode ficar aquém das necessidades.

Tabela 02: Aços vs dureza alcançada através da nitretação a gás.

Material	Dureza Vickers (HV)
SAE 1010	316 – 331
SAE 1020	331 – 353
SAE 1030	341 – 365
SAE 1045	393 – 458
SAE 4340	672 – 715
SAE 8640	680 – 740
SAE 52100	700 – 760

Fonte: Mazzano N. (2013).

Para Kikuchi S. et al (2010), a nitretação gasosa é geralmente muito difícil de aplicar satisfatoriamente em aço inoxidável austenítico devido à existência de um filme passivo na superfície. Embora este material tenha sido amplamente utilizado em várias aplicações de engenharia, apresenta baixa resistência ao desgaste e baixa dureza.

4.4.5 AÇOS TRATADOS POR INDUÇÃO

Segundo Mazzano N. (2013), os aços tratados por indução são endurecidos superficialmente, como na cementação. As peças são vulneráveis a deformações, pelo fato de haver choque térmico no processo. Normalmente, o indutor tem forma circular e, portanto, aquece todos os dentes simultaneamente. Porém, nas rodas em que os dentes são grandes o suficiente, o tratamento pode ser feito vão por vão, para simplificar a construção do indutor. A profundidade endurecida deve ser regular e uniforme ao longo de toda a extensão do dentado. Após o tratamento por

indução, é necessária uma operação para alívio de tensões. A dureza do material após isso deve ser:

- mínima = 42 Rc;
- máxima = 54 Rc.

4.4.6 AÇOS TRATADOS POR CHAMA

Lee M.K. Et al (2004), o endurecimento por chama é um processo útil que pode ser prontamente aplicado para prolongar a vida útil de muitas peças de máquinas. As aplicações representativas incluem lâminas para turbinas a vapor e a gás, engrenagens para máquinas de papel, rolos para as indústrias de impressão e metalurgia, cames para máquinas de embalagem, bases de máquinas-ferramenta e vários componentes automotivos. Essas várias aplicações desse processo, são provocadas pela capacidade de endurecer regiões local, pela operação simples, pelo processamento de alta velocidade e baixo custo, pela ausência de formação de interfaces e pelas propriedades mecânicas aprimoradas. Além disso, a modificação da superfície por endurecimento por chama envolve simplesmente o aquecimento rápido da superfície até temperaturas elevadas pelo impacto direto de uma chama de alta temperatura seguida imediatamente de resfriamento, e assim é basicamente o processo de não equilíbrio com períodos de tempo muito mais curtos do que aqueles para o endurecimento por chama. Existem três parâmetros importantes que precisam ser controlados no processo de endurecimento por chama, são eles: os níveis de dureza, profundidade de endurecimento e tensão residual. Tanto a dureza quanto a profundidade de endurecimento são os parâmetros de projeto fundamentais para os aspectos de engenharia, principalmente quando as peças precisam ser endurecidas em um nível e profundidade necessários. Outro requisito para garantir o uso prático é controlar as tensões residuais elásticas em um nível e natureza moderados, uma vez que o endurecimento por chama do aço pode induzir alta tensão de tração que o torna sensível à corrosão sob tensão (CST), fratura frágil e falhas por fadiga.

4.6 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Segundo Dou, C (2018), as vibrações de caixas de engrenagens defeituosas apresentam grandes complexidades. Portanto, a dinâmica e os níveis de ruído das vibrações das caixas de engrenagens variam com a operação das caixas de engrenagens. Como resultado, a não linearidade e o determinismo dos dados podem servir para descrever as condições de funcionamento das caixas de câmbio. No entanto, medir a não linearidade e o determinismo dos dados é um desafio.

Segundo Shen. Z (2020), a vibração de uma caixa de engrenagens planetárias (PG) é complexa e mutuamente modulada, o que torna difícil detectar as características fracas de uma falha incipiente.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

Para a realização deste trabalho, foram utilizados alguns equipamentos, como pode ser observado na lista abaixo:

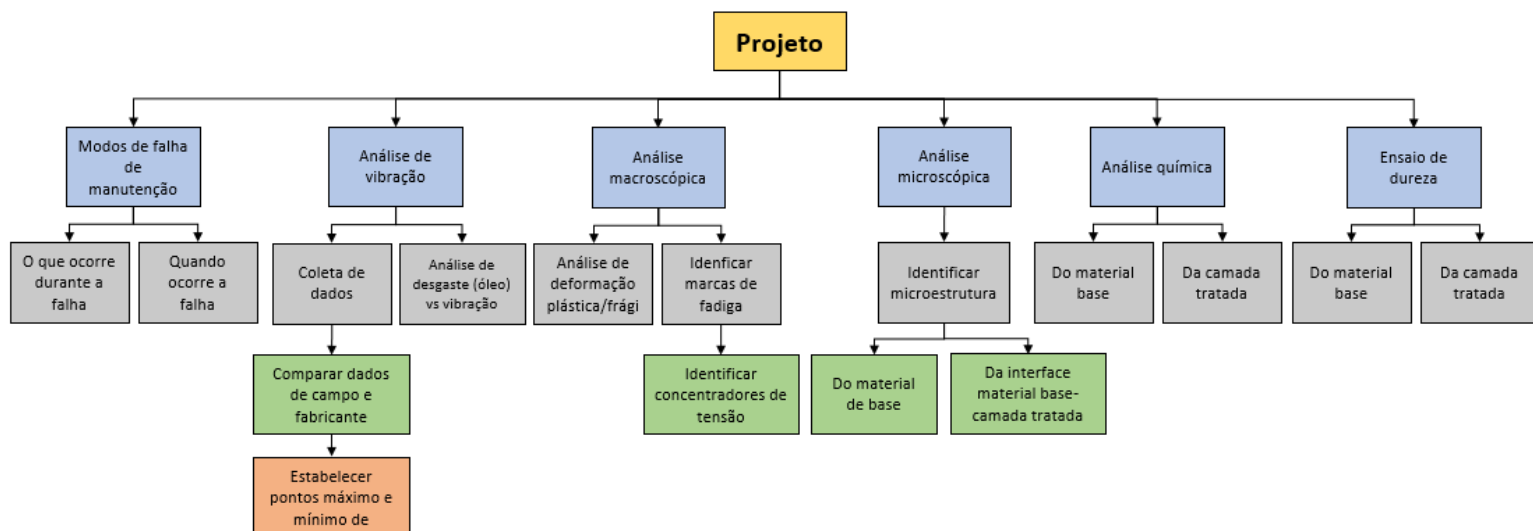
- Equipamento de coleta de dado de vibração CSI 2130;
- Equipamento para ensaio de partícula magnética Yoke – pó seco;
- Máquina fotográfica digital Sony;
- Microscópio óptico Olympus BX51M;
- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), FEI, modelo Quanta 400 FEG;
- Analisador de carbono e enxofre, Leco, modelo CS-600;
- Espectrômetro de emissão óptica, ARL Fisons, modelo 3460 AES;
- Balança analítica, Sartorius, modelo CPA 124S.

5.2 MÉTODOS

5.2.1 ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA NA MANUTENÇÃO

Para uma melhor análise e entendimento do trabalho a ser apresentado, foi elaborado um fluxograma didático que irá conduzir cada etapa do trabalho desenvolvido, com a finalidade de analisar, identificar a causa raiz do problema da falha do redutor de elevação das escavadeiras de minério e propor uma possível solução que bloqueie a aquela causa ou minimize os efeitos das falhas. Com isso, é mostrado o fluxo global de trabalho.

Fluxo 01: Árvore de análise de falha do redutor de elevação.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

5.2.2 MODOS DE FALHA DE MANUTEÇÃO

5.2.2.1 O QUE OCORRE DURANTE A FALHA DO REDUTOR

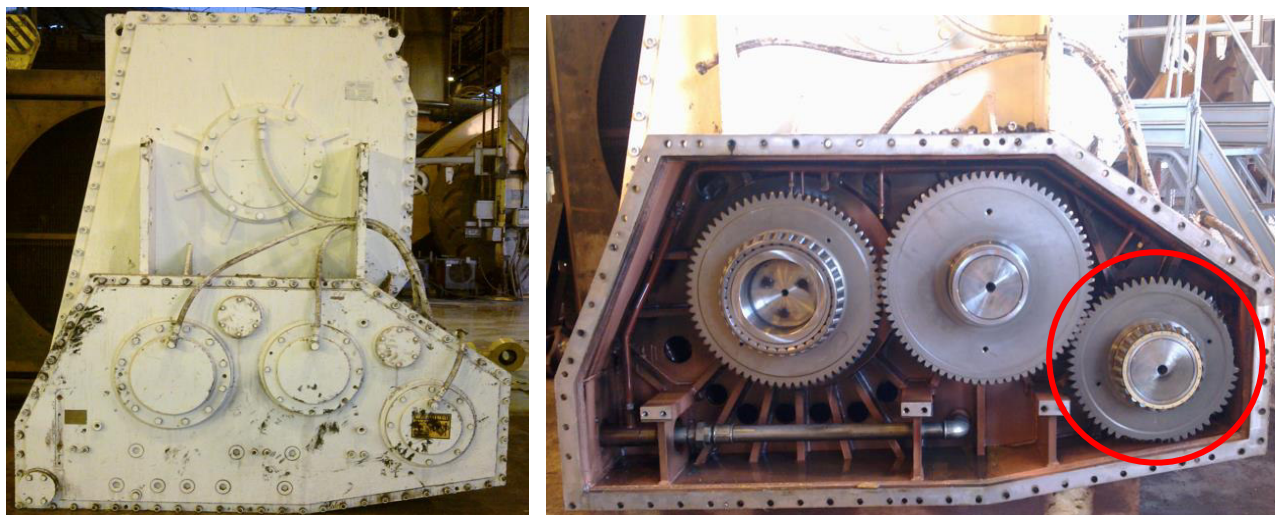
Os redutores de velocidades são componentes instalados em determinados equipamentos, utilizado para reduzir a velocidade (V) oriunda de um motor, na qual possui uma velocidade de trabalho superior à que é necessário para determinada aplicação, ou seja, isso ocorre quando necessitamos reduzir ou aumentar aquele vetor quando comparado V_0 e V_f de trabalho.

Quando ocorre alguma falha no componente redutor, a escavadeira responsável por lavrar o minério, fica inoperante, ou seja, o ativo permanece indisponível, necessitando da atuação da manutenção, assim como, da engenharia para que seja realizada à análise da falha e retornar com o equipamento em operação.

Antes que tudo isso ocorra, a escavadeira apresenta elevada vibração durante a sua operação, causando baixo rendimento durante a escavação do banco de minério e carregamento de caminhões. Diante dessa situação, é realizada a remoção do redutor para que possa prosseguir com a análise das engrenagens e rolamentos. Ao abrir a tampa daquele componente, é observado a integridade de cada dente da engrenagem, observando-se fraturas nesses dispositivos da engrenagem de entrada, figura 06, necessitando de uma análise

macroestrutural, com a finalidade de se saber como o material estava se comportando durante a sua falha.

Figura 06: Redutor de levacão da escavadeira 7495HR com a tampa aberta e evidenciado a fratura dos dentes da engrenagem de entrada.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

5.2.2.2 QUANDO OCORRE A FALHA DO REDUTOR

A falha do redutor ocorre durante a extração de minério, sendo assim, ao realizar o movimento de escavar e em seguida elevar a caçamba do implemento do equipamento, ocorrem vibrações excessivas e baralhos anormais durante esse movimento.

5.2.3 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

5.2.3.1 COLETA DE DADOS

As coletadas de dados servem para que possamos realizar a sua mineração e conseguir obter uma direção de como chegar nos resultados esperados. Para isso, gastou-se um tempo relativamente maior na obtenção daqueles dados para garantir a sua confiabilidade. Com isso, poderemos os dados literários com o que são coletados em campo, a fim de se obter os limites toleráveis, mínimos e máximos, de um determinado projeto.

5.2.3.2 ANÁLISE DE DESGASTE (ÓLEO) VS VIBRAÇÃO COLETA DE DADOS

Essas análises são de fundamental importância para que seja realizado um monitoramento de vida dos componentes, onde são observados degradação do material, através da análise de óleo e a consequência desse fenômeno com o acompanhamento da análise de vibração.

5.2.4 ANÁLISE MACROSCÓPICA

5.2.4.1 ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E FRÁGIL

Uma das análises dos materiais consistem em identificar o seu comportamento quando colocado sob uma determinada solicitação, seja ela axial de tração ou compressão, torção e cíclica. A análise superficial é fundamental para identificarmos as deformações plásticas, oriunda de materiais dúcteis, e frágil, que parte de um material mais resistente. Esse tipo de observação pode ser acompanhado do gráfico de tensão-deformação.

5.2.4.2 IDENTIFICAR MARCAS DE FADIGA

A observação da superfície de fratura é de extrema importância, pois ela irá auxiliar na identificação de marcas de fadiga e concentradores de tensão, na qual são oriundas de esforços cíclicos que determinadas peças, componentes ou corpos de prova foram submetidos, além de pontos onde se iniciaram as fraturas.

5.2.5 ANÁLISE MICROSCÓPICA

5.2.5.1 IDENTIFICAR MICROESTRUTURA

Todo material é constituído de uma microestrutura, seja ele metálico, cerâmico ou polímero, podendo determinar o modo de fabricação da peça/componente, se foi realizado algum tratamento térmico ou até mesmo fornecer informações como: existência de microconstituintes, falhas oriundas do tipo de tratamento térmico e inclusões.

5.2.6 ANÁLISE QUÍMICA

5.2.6.1 ANÁLISE DE MATERIAL BASE

Em materiais que são compostos por tratamento superficiais, é importante a realização de análise química de todo o material, onde poderemos identificar a diferença de elementos de liga presente na material base e na região tratada. Isso proporciona, de forma prática e didática, um modelo literal de sua resistência a determinada aplicação.

5.2.7 ENSAIO DE DUREZA

5.2.7.1 DUREZA DO MATERIAL BASE E CAMADA TRATADA

Como já mencionado, em determinados materiais compostos por tratamentos superficiais, seja ele por nitretação ou cementação, a análise de dureza irá nos fornecer dados que podem auxiliar na aplicação de determinado componente, como é o caso de engrenagens, rotores, tubos e eixos. Que nestes casos, são submetidos a solicitações adversas que podem promover rupturas catastróficas, caso não tenham sido realizadas as devidas análises de dureza que antecedem a sua aplicação.

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Todos os resultados obtidos nesse trabalho, foram obtidos através de análises realizadas no Laboratório do Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Universidade de São Paulo (IPT-SP).

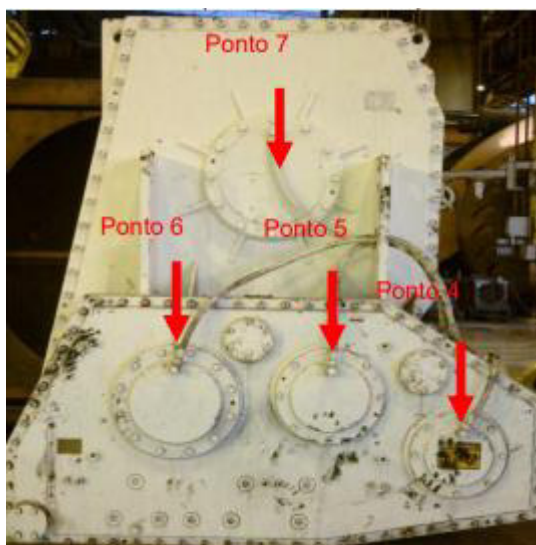
6.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Durante a operação dos equipamentos, após a identificação das primeiras falhas, foram iniciadas as coletas de dados de vibração semanalmente, com a finalidade de se obter os parâmetros preditivos que antecedem as falhas dos redutores. Onde segundo Dou, C (2018), a dinâmica e os níveis de ruído das vibrações das caixas de engrenagens variam com a operação das caixas de engrenagens.

6.2 COLETA DE DADOS DE VIBRAÇÃO

Como dito por Shen. Z (2020), a vibração de uma caixa de engrenagens é complexa e é difícil detectar as características de uma falha. Com isso, para a realização da coleta de dados de vibração, foi definido uma rota de inspeção de forma semanal, com a finalidade de levantar a maior quantidade de dados possíveis para se obter os limites toleráveis de operação, sem que o redutor falhe, ou seja, sem que ocorra uma falha catastrófica das engrenagens do componente. Além disso, a definição de pontos de coleta no redutor é fundamental, sendo monitorado 4 pontos específicos no redutor.

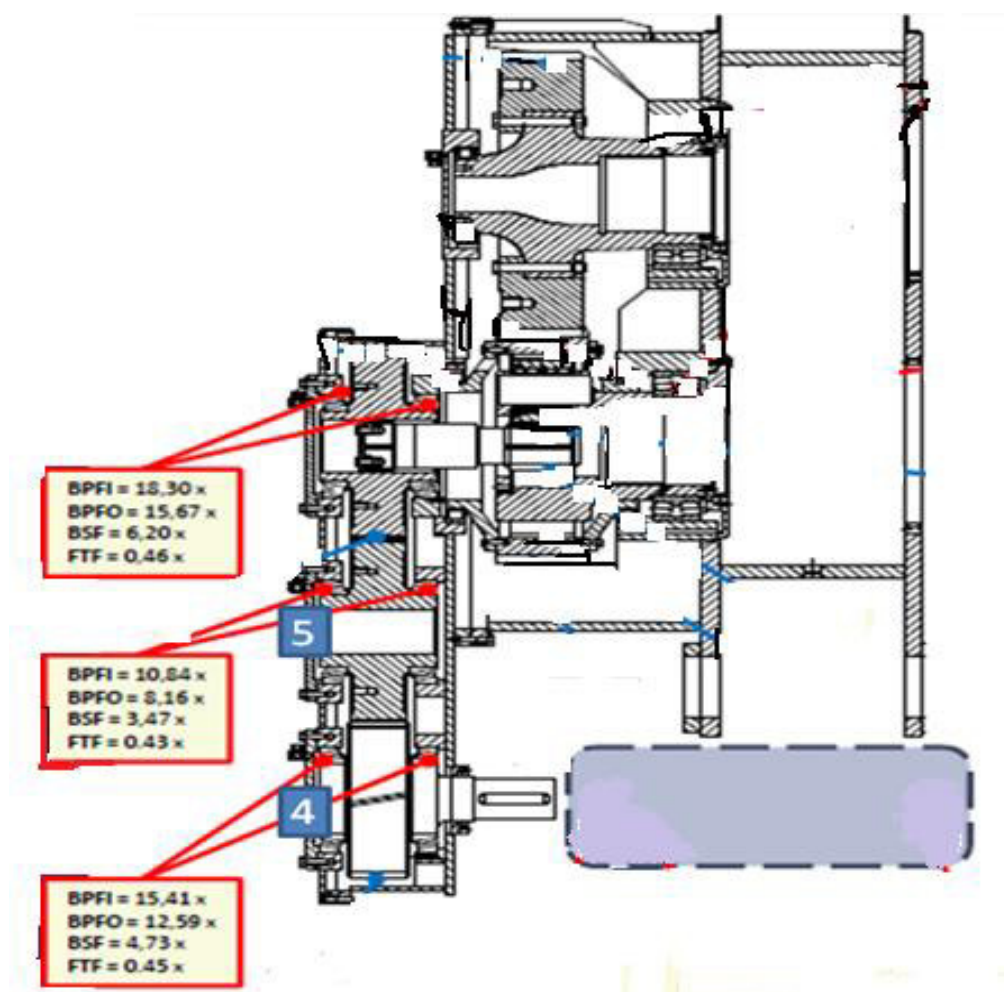
Figura 07: Pontos de monitoramento/coleta de vibração do redutor de levacão.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Foi verificado que de acordo com o fabricante os limites de vibração estariam entre 12,59 mm/s e 15,41 mm/s, conforme figura 08.

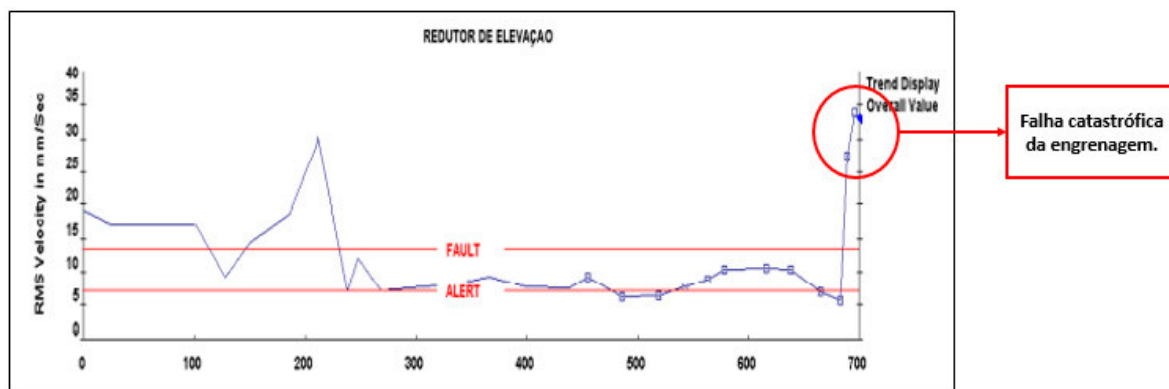
Figura 08: Parâmetros de vibração do redutor de elevação.



Fonte: Manual do equipamento CAT.

Diante disso, foi observado que os limites de vibração global tolerável encontrado durante as análises estão entre 7,0 mm/s e 13 mm/s, acima disso, o conjunto de engrenagem tem falha catastrófica, conforme gráfico abaixo.

Gráfico 01: Histórico de vibração do redutor de elevação.



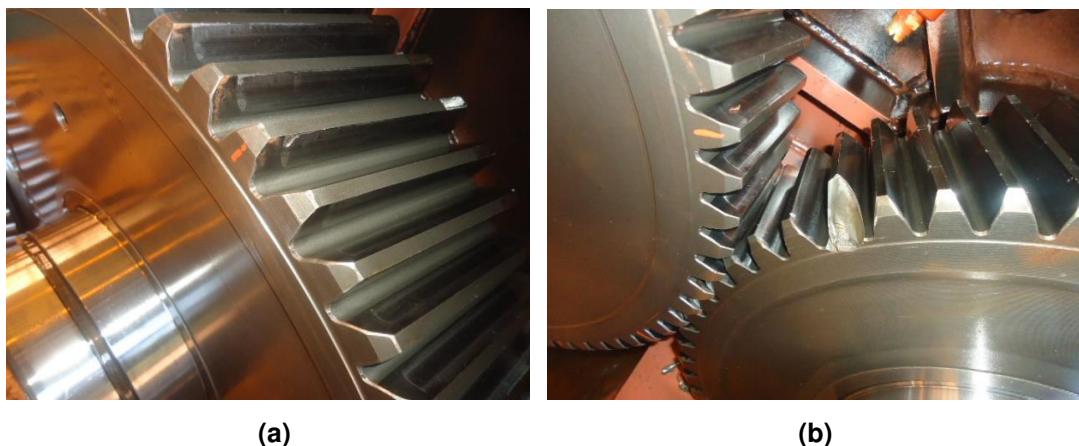
Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Comparando os dois resultados, fabricante vs banco de dados, verificamos que os parâmetros do fabricante estão além do que o componente pode suportar, tendo em vista que o limite máximo suportado pelo redutor foi de 13 mm/s e acima disso, ocorre a fratura do dente.

6.3 ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO NO MATERIAL

De acordo com Shuklan A.K. et al (2013), é essencial investigar a causa raiz da falha em termos de projeto, qualidade do material e procedimento de fabricação. Esta investigação trata principalmente das prováveis causas de danos em serviço. Desta forma, após a remoção da engrenagem de entrada do redutor de elevação da escavadeira, foi possível realizar a análise da fratura do dente, onde foi observado que a ruptura do dente se deu de forma frágil em alguns dentes, ou seja, não foi identificado deformações plásticas, figura 09-a. Isso pode ser confirmado, por não conter alongamento e/ou escoamento do material ao longo da engrenagem, além disso, observa-se um arrancamento do dente, ou seja, a quebra do dente, como mencionado por Radhakrishnan S. (2019) afirmando que uma das falhas dos dentes de engrenagem é a sua quebra, característica de material frágil, figura 09-b.

Figura 09: (a) Engrenagem intermediária do redutor sem a presença de deformação plástica; (b) Engrenagem de entrada apresentando fratura do dente.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

6.4 IDENTIFICAÇÃO DE MARCAS DE PRAIA

Diante das análises dos dentes, foi observado, de acordo com o aspecto da superfície de fratura, o surgimento de pequenas marcas de praia, na qual se caracteriza uma fratura por fadiga que se propaga no pé do dente. Segundo LIANG et al., 2018, se essas anomalias não puderem ser detectadas precocemente, pode ocorrer grandes perdas econômicas ou até mesmo uma catástrofe, como pode ser observado na figura 10.

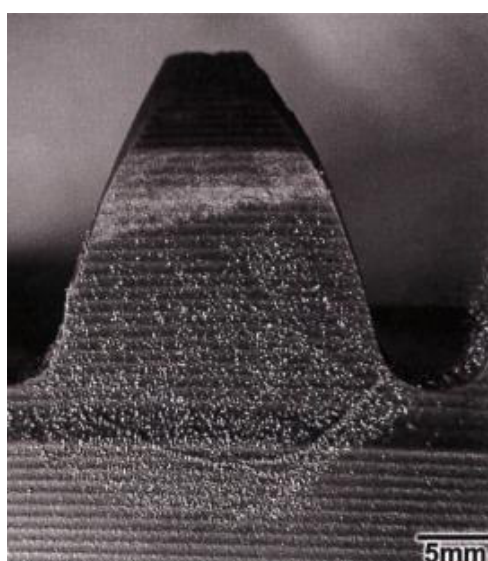
Figura 10: Fratura do dente com evidência de pequenas marcas de praia, demonstra que o componente obteve fadiga, ruptura por baixo ciclo.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Durante a observação do material, foi necessário verificar se haviam trincas superficiais na região do dente e com isso, realizamos a técnica de partículas magnéticas. Desta forma, foi observado que no pé do dente ocorre uma trinca capaz de proporcionar o seu arrancamento, conforme é mostrado na figura 11.

Figura 11: Ensaio magnético no dante da engrenagem, mostrando que a trinca inicia-se no pé do dente e se propaga até ser arrancado.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

6.5 IDENTIFICAÇÃO DA MICROESTRUTURA

Foram realizadas análises nos dentes da engrenagem, com a finalidade de identificar as regiões de interface do tratamento superficial, material base e identificação de inclusões e/ou imperfeições.

Através de uma câmera digital e com o auxílio do ataque com ácido Nital a 10%, foi possível ver as interfaces entre o metal base e camada endurecida, figura 12.

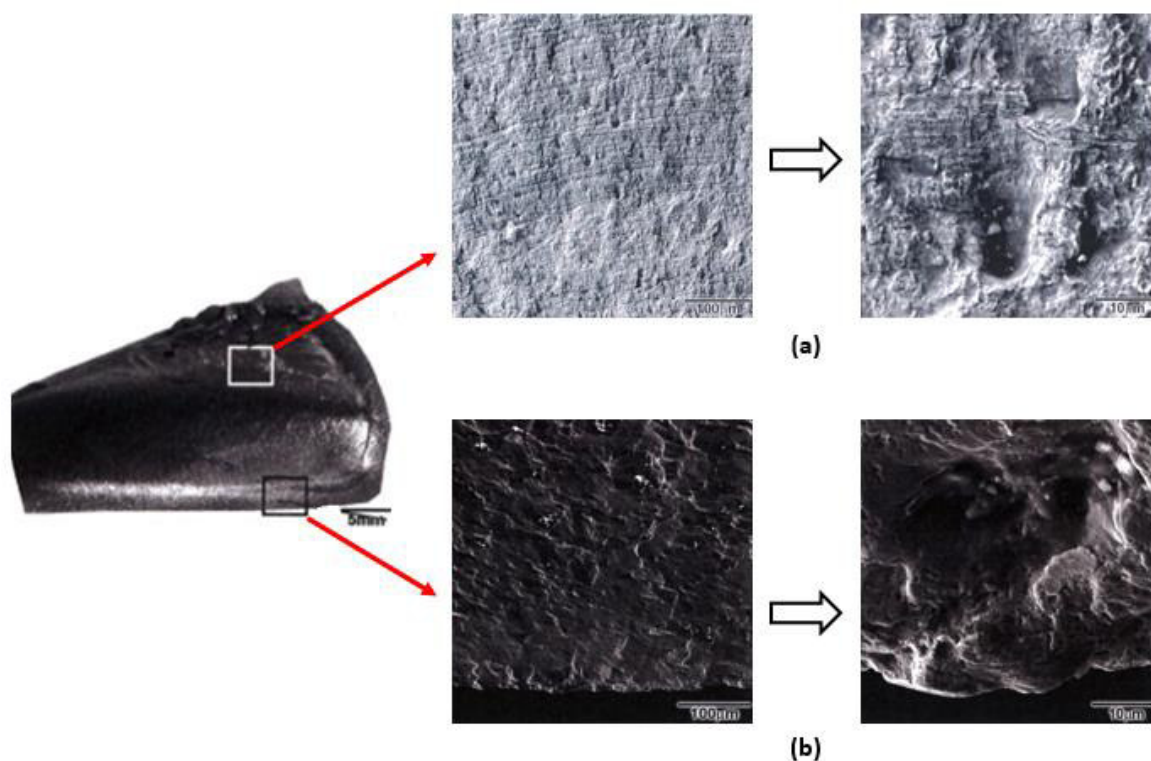
Figura 12: Aspecto macroestrutural do material mostrando a camada endurecida superficialmente e material base.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Através do Microscópio Eletrônico de Varredura, foram identificadas cavidades na região de fratura, na qual indica nucleações múltiplas e estrias de fadiga na região de propagação de trinca, figura 13.

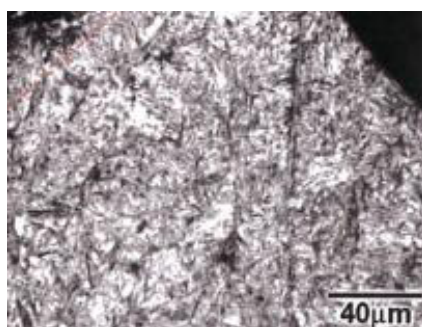
Figura 13: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do dente da engrenagem fraturado, **(a)** Estrias de fadiga no pé do dente; **(b)** Cavidade na superfície do dente.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

A análise através do MO, com ataque de Nital a 2% na amostra, nos revelou que a microestrutura da região de interface entre o tratamento superficial e material base, é constituído predominantemente de Martensita, figura 14.

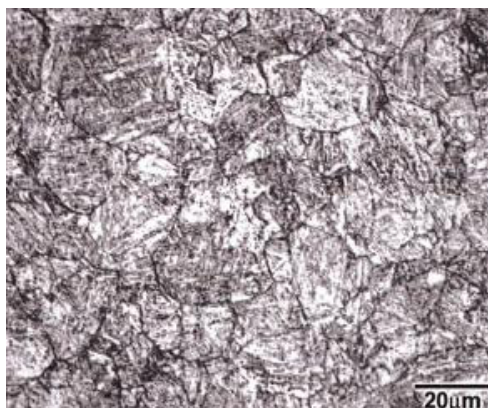
Figura 14: Microscópio Óptico, apresentando microestrutura de Martensita na região de tratamento superficial.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Também foi analisado o material base do material, sendo também identificado que a sua microestrutura é composta por Martensita revenida, figura 15.

Figura 15: Microscópio Óptico, apresentando microestrutura de Martensita revenida no material base.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

6.6 ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL

Foi realizada análise química nos dentes fraturados, e comparado com o aço para cementação, de acordo com a norma DIN EM 10084, onde pode-se observar a seguinte composição química do aço, tabela 04:

Tabela 04: Composição química dos dentes fraturados do eixo pinhão.

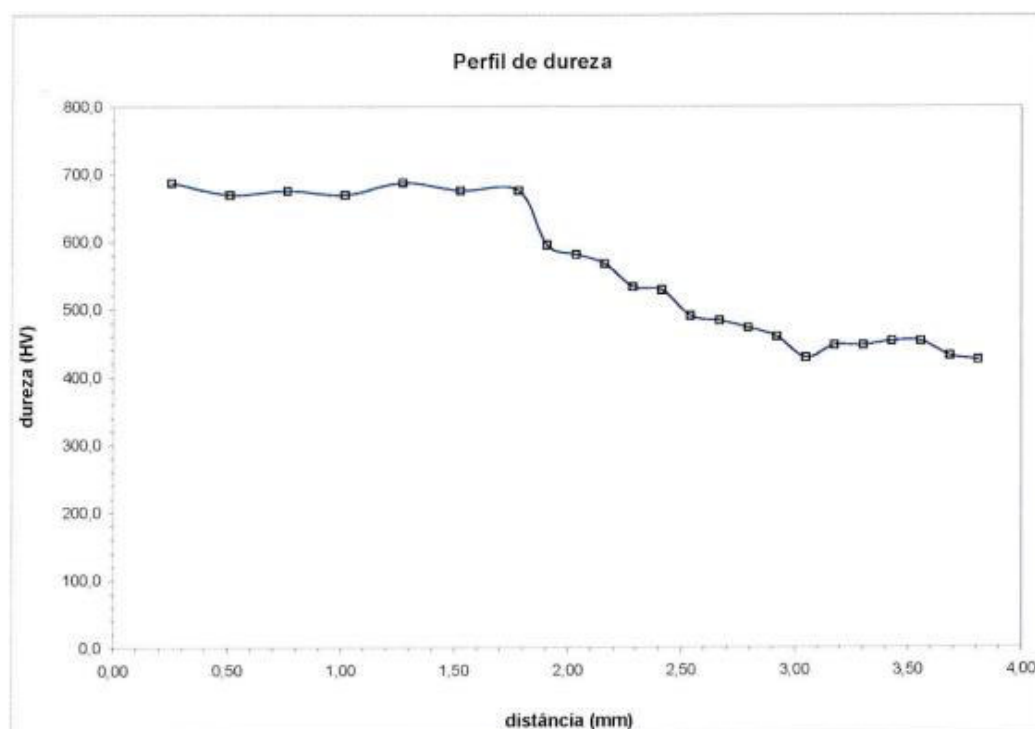
Elementos (%)	LEME124-1/12	Aço DIN 18CrNiMo7-6 (norma DIN EN 10084)
Carbono (C)	0,17 ± 0,01	0,15 - 0,21
Silício (Si)	0,22 ± 0,01	0,40 máximo
Manganês (Mn)	0,56 ± 0,02	0,50 - 0,90
Fósforo (P)	0,012 ± 0,001	0,035 máximo
Enxofre (S)	0,006 ± 0,001	0,035 máximo
Cromo (Cr)	1,61 ± 0,02	1,50 - 1,80
Níquel (Ni)	1,59 ± 0,02	1,40 - 1,70
Molibdênio (Mo)	0,31 ± 0,01	0,20 - 0,35
Cobre (Cu)	0,018 ± 0,001	-
Vanádio (V)	0,007 ± 0,001	-
Cobalto (Co)	0,008 ± 0,001	-
Alumínio (Al)	0,028 ± 0,002	-
Estanho (Sn)	0,015 ± 0,001	-
Tungstênio (W)	0,018 ± 0,001	-

Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Diante disso, foi constatado que o aço utilizado para a fabricação da engrenagem, está dentro do especificado, ou seja, podemos afirmar que o aço em análise é o 18CrNiMo7-6.

6.7 DUREZA DO MATERIAL

Para Padilha, A.F. 2000, o ensaio de dureza é provavelmente o ensaio mecânico mais frequentemente utilizado, tanto em empresas como em universidades e centros de pesquisas. Com isso, para definir o tamanho da região cementada, foi realizado aquele ensaio, onde realizou-se o corte transversal de um dos dentes. A partir daquela análise, foi identificado o tamanho da área cementada e a dureza do material base. Porém para isso, foi tomado 50 HRC (513 HV) como valor de referencia equivalente, de acordo com a norma SAE J423a.

Gráfico 02: Ensaio de dureza realizado no dente da engrenagem

Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

Observando o gráfico acima, podemos identificar que o tamanho da região de cementação é aproximadamente 1,70 mm, após isso, os valores de dureza começam a cair, onde encontramos valores de transição que está entre 1,70 mm e 3,00mm, chegando em seguida no material base, 3,00 mm de distância da superfície.

As durezas encontradas podem ser vistas na tabela 05.

Tabela 05: Composição química dos dentes fraturados do eixo pinhão.

Região de medição da dureza	HRC
Superfície do dente	66
Núcleo do dente (região de transição)	49
Núcleo da peça	43

Fonte: PRÓPRIO AUTOR.

7 CONCLUSÕES

Diante do trabalho realizado, durante a desmontagem do redutor de elevação, foi verificado que os dentes da engrenagem de entrada encontravam-se fraturados, com evidências de fadiga e arrancamento do dente no material base.

Foi realizado uma análise microscópica, sendo identificado a microestrutura de martensita ao longo do dente.

Também foi visto que, a composição química do material utilizado para a fabricação da engrenagem está de acordo com a norma DIN EM 10084, confirmando que o produto estaria dentro do especificado.

Observou-se que a dureza caiu ao longo da extremidade até o centro, como já era de se esperar, devido ao tratamento superficial. Mesmo assim, foi encontrados valores de dureza entre 43 e 66 HRC.,

A rota de inspeção preditiva inserida no processo de manutenção, foi primordial para a identificação do tempo ótimo de troca do componente, evitando falhas catastróficas e maiores custos. Além disso, a identificação dos pontos mínimos e máximos de monitoramento, contribuiu para um monitoramento mais assertivo, fazendo com que, preditivamente, a manutenção possa ter mais confiabilidade dos componentes em operação.

Mediante todo esse estudo, foi visto que as falhas ocorrem devido ao arrancamento, evidenciando que houve uma concentração excessiva de carga, que caracterizou um desalinhamento entre as engrenagens. Fato observado com a elevação da vibração acima de 13 mm/s.

Foi visto que a composição química do material se mostrou compatível com a classe de aços que podem ser tratados superficialmente por cementação.

A dureza por sua vez, demonstrou na superfície compatível com os materiais cementados. Contudo, a medida que se aproxima do núcleo do dente, a dureza apresenta uma fase intermediária de menor dureza até chegar na base.

A identificação de fadiga na fratura do dente, é oriunda de cargas cíclicas, onde são submetidos os dentes, que podem ser oriundas de forças aplicadas em local inadequado, ocasionando uma sobrecarga no pé do dente, favorecendo a nucleação de trinca e consequentemente aquele mecanismo de fratura.

Com isso, conclui-se que, a fratura de forma catastrófica do dente do redutor de elevação das escavadeiras de grande porte, se deu devido a erros de

processo de monitoramento, assim como, excesso de carga no pé do dente da engrenagem que causa esforço excessivo, fazendo com que ocorra a nucleação de uma trica e através do baixo ciclo de tensão, ocorra a falha de alguns dentes por fadiga e os demais por arrancaento.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a realização de trabalhos futuros, espera-se realizar uma análise de falha no conjunto de componentes dos compressores de perfuratrizes, abordando a confiabilidade do componente e as suas falhas catastróficas.

9 REFERÊNCIAS

9.1 REFERÊNCIAS NOMINAIS

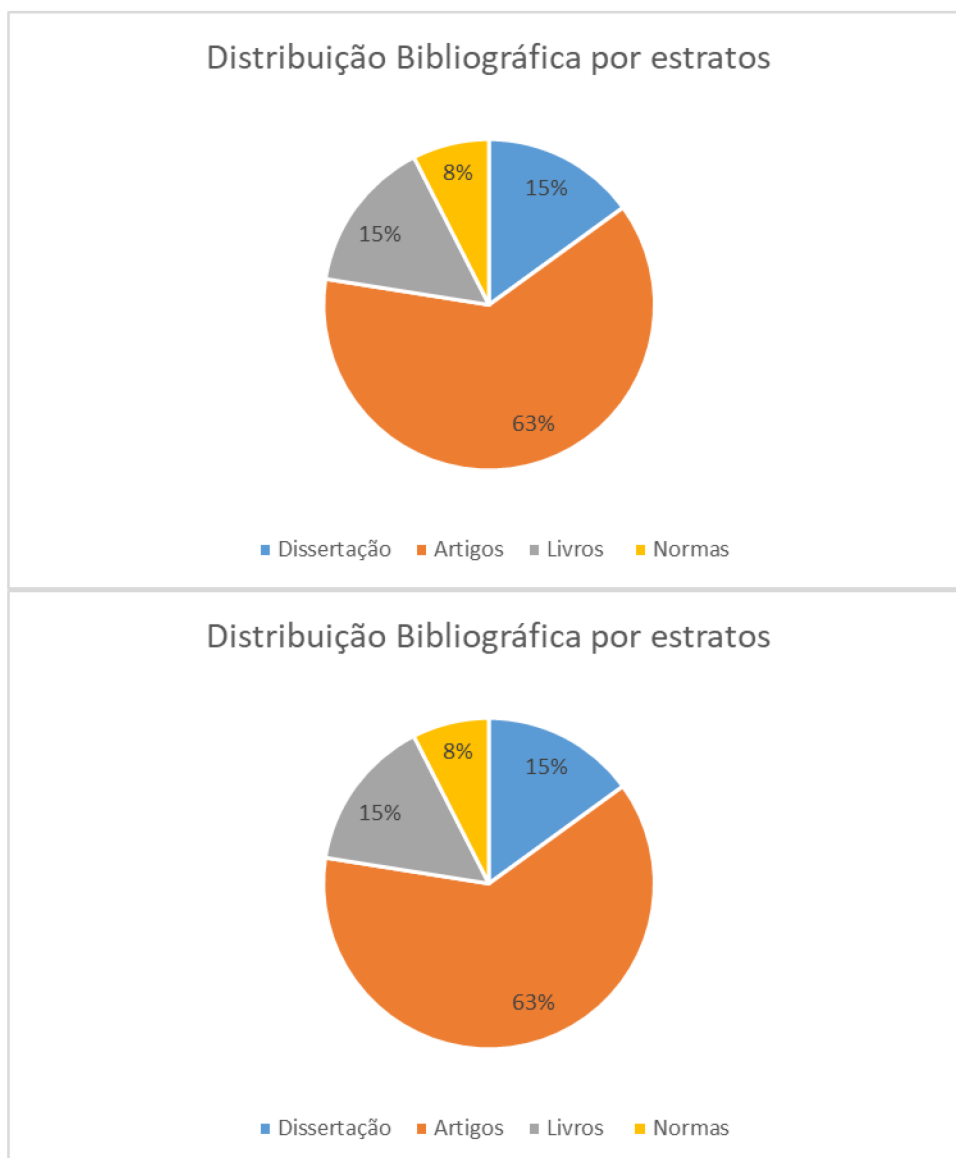
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5462 – Confiabilidade e manutenibilidade - Terminologia**, São Paulo, 2016.
- Baydar N. (2003), **Detection of gear failures via vibration and acoustic signals using wavelet transform**, percentil Scopus: 99%, Mechanical Systems and Signal Processing.
- Chatterjee P., Chakraborty S. (2012), **Material selection using preferential ranking methods**, percentil Scopus: 96%. Journal Materials & Design.
- Chen X, Yang X, Zuo M. J, Tian Z. (2021). **Planetary Gearbox Dynamic Modeling Considering Bearing Clearance and Sun Gear Tooth Crack. SENSORS**, percentil Scopus: 88%. Canada, 2021 (ISSN: 1424-8220).
- Chiaverini V. (2012), **Aços e ferros fundidos**, Editora ABN, 7ª edição.
- Colás R., George E. Totten G.E. (2016), **Encyclopedia of iron, steel, and their alloys**, e-book ISBN.
- Delgado-Pietro M, Rios R.O, Picot A. (2022). **Fault Detection of Planetary Gears Based on Signal Space Constellations. SENSORS**, percentil Scopus: 88%. Spain, 2022. (ISSN: 1424-8220).
- Ding P, Wang X, **3D SSY Estimate of EPFM Constraint Parameter under Biaxial Loading for Sensor Structure Design, SENSORS**, percentil Scopus:88%. China, 2019. **SENSORS**, percentil Scopus:88%, (ISSN: 1424-8220).
- Dou C, Wei X, Lin J. (2018). **Fault Diagnosis of Gearboxes Using Nonlinearity and Determinism by Generalized Hurst Exponents of Shuffle and Surrogate Data. ENTROPY**, percentil Scopus:88%. CHINA, 2018. (ISSN: 1099-4300).
- Fagundes L.D. (2006). **Gestão do Conhecimento na análise de falhas: mapeamento de falhas através de sistema de informação**, UNIFEI, 2006.
- Flores P, Gomes J. (2014). **Cinemática e Dinâmica de Engrenagens - Aspectos Gerais sobre Engrenagens**, Universidade do Minho, Portugal.
- F.Ashrafizadeh (2003), **Influence of plasma and gas nitriding on fatigue resistance of plain carbon (Ck45) steel**, percentil Scopus: 88%. Journal Surface and Coatings Technology.

- Garcia N.G, Lopes P.E.K, Pimenta J.S (2018), **Análise da cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos de aço SAE 4320**, Revista técnico-científico, Paraná.
- IBRAM Mineração do Brasil, **8º Anuário Mineral**, 2018.
- Josifovic D. Ivanovic L. (2010), **Tribological aspects of contemporary gear materials**, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 16, N°4.
- Kapelevich A. (2020), **Optimal polymer gear design: metal-to-plastic conversion**, Journal Gear technology.
- Kikuchi S., Nakahara Y., Komotori J. (2010), **Fatigue properties of gas nitrided austenitic stainless steel pre-treated with fine particle peening**, percentil Scopus: 96%. International Journal of Fatigue.
- Lee M.K., Kim G.H., Kim K.H., Kim W.W. (2004), **Control of surface hardnesses, hardening depths, and residual stresses of low carbon 12cr steel by flame hardening**, percentil Scopus: 88%. Journal Surface and Coatings Technology.
- Liang X, Zuo M.J, Feng Z. (2018). **Dynamic modeling of gearbox faults: A review**, percentil Scopus: 99%, Mechanical Systems and Signal Processing.
- Li X. (2022). **Vibration Separation Methodology Compensated by Time-Varying Transfer Function for Fault Diagnosis of Non-Hunting Tooth Planetary Gearbox. SENSORS**, percentil Scopus: 88%. China, 2022. (ISSN: 1424-8220).
- Martins M, Casteletti L.C, Bonavina L.F, Forti L.R.N. **Análise microestrutural de aços inoxidáveis altamente ligados: da amostragem à interpretação**, 2011.
- Mazzo N. (2013), **Engrenagem cilíndricas, da concepção à fabricação**, Editora Blucher.
- Medeiros Braz J.L, Biehl L.V, De Souza J, Borges H.O, Bonamigo A.O, Vieira R.L (2021), **Avaliação da efetividade do tratamento termoquímico de carbonitreção em engrenagens de motocicletas, Matéria**, percentil Scopus: 20%, UFRJ, 2021. (ISSN: 1517-7076).
- Melconian S, **Elemento de máquinas**, Editora Erica, 9º edição.
- Oliveira S.F.P.S. (2013), **Análise do comportamento dos aerogeradores em situação de anomalia**, Dissertação de mestrado, ISEP, 2013.
- Padoin E. (2011), **Modelagem matemática da dinâmica da não linearidade de folga em uma junta rotativa de um robô scara com transmissão por engrenagens**, Dissertação de mestrado, UNIJUÍ, 2011.

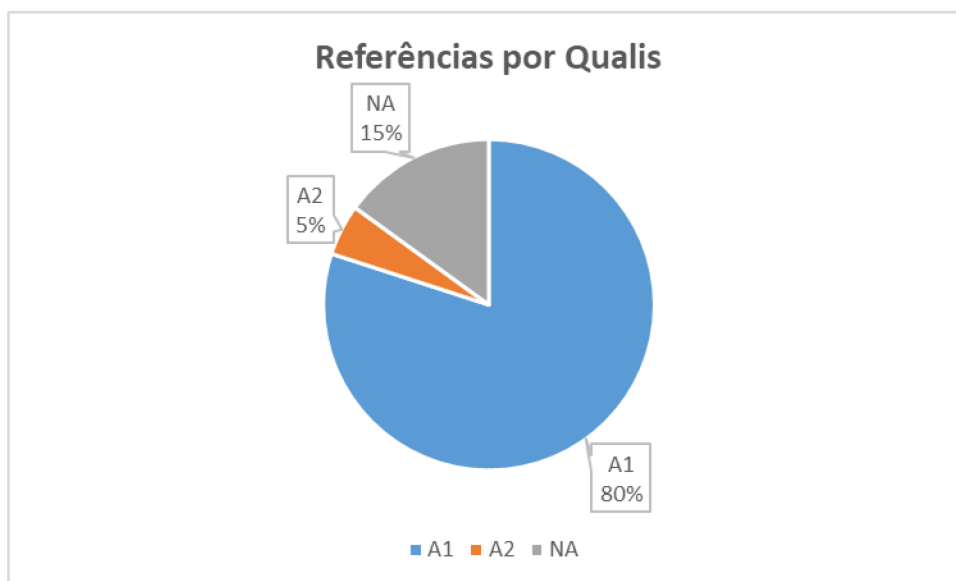
- Padilha A.F, **Materiais de engenharia, microestrutura e propriedade**, HEMUS S.A, 2000.
- Petrescu R.V.V., Aversa R., Akash B., Bucinell B.R., Corchado J.M., Apicella A., Petrescu F.I.T. (2017), **Gears**, American Journal of Engineering and Applied Science.
- Radhakrishnan S., Lee Y.T.T, Rachuri S., Kamarthi S. (2019), **Complexity and entropy representation for machine component diagnostics**, PLOS ONE, percentil Scopus: 87%, CHINA, 2019. (ISSN: 1932-6203).
- Schmidt S, Zimroz R, Chaari F, Heyns P.S, Haddar M. (2020). **A Simple Condition Monitoring Method for Gearboxes Operating in Impulsive Environments**. SENSORS, percentil Scopus: 88%. South Africa, 2020. (ISSN: 1424-8220).
- Scurson G.F. (2021). **Influência do Tempo em Criogenia na Microestrutura do Aço AISI D2**, Dissertação de mestrado, FURG, 2021.
- Shen Z, Shi Z, Zhen D, Zhang H, Gu F. (2020). **Fault Diagnosis of Planetary Gearbox Based on Adaptive Order Bispectrum Slice and Fault Characteristics Energy Ratio Analysis**. SENSORS, percentil Scopus: 88%. CHINA, 2020. (ISSN: 1424-8220).
- Shuklan A.K Das P., Dutta S., Ray S., Roy H. (2013), **Engineering Failure Analysis**, Elsevier.
- Tayer P.D.N. (2018), **Avaliação de fadiga de contato em materiais para engrenagens utilizando ensaios de rolamento de esfera sobre disco**, Dissertação de mestrado, USP, 2018.
- Tobie T. , Hippenstiel F., Mohrbacher H. (2017), **Optimizing gear performance by alloy modification of carburizing steels**, percentil Scopus: 83%. Journal Metals.
- Yin A, Yan Y, Zhang Z, Li C, Sanchez R.V. (2020). **Fault Diagnosis of Wind Turbine Gearbox Based on the Optimized LSTM Neural Network with Cosine Loss**. SENSORS, percentil Scopus:88%. CHINA, 2020. (ISSN: 1424-8220).
- Zhang X., Wang J., Fan H., Pan D. (2018), **Erosion–corrosion resistance properties of 316l austenitic stainless steels after low-temperature liquid nitriding**, percentil Scopus: 95%. Journal Applied Surface Science.
- Zhu J, Deng A, Li J, Deng M, Sun W, Cheng Q, et al. (2020). **Resonance-based sparse adaptive variational mode decomposition and its application to the feature extraction of planetary gearboxes**. PLOS ONE, percentil Scopus:87%, CHINA, 2020. (ISSN: 1932-6203).

- **8º Anuário Mineral do Pará.** Sindicato **das indústrias minerais do estado do Pará.** SIMINERAL, pág. 22, 2019.

9.2 REFERÊNCIA POR ESTRATO



9.3 REFERÊNCIA POR QUALIS



9.4 REFERÊNCIA POR DATA DOS ARTIGOS

