



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME SANTIAGO MENDES CANTALICE

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA RCA PARA REPROJETO DE UM REDUTOR
PLANETÁRIO EM UM VEÍCULO FORA DE ESTRADA**

Recife
2023

GUILHERME SANTIAGO MENDES CANTALICE

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA RCA PARA REPROJETO DE UM REDUTOR
PLANETÁRIO EM UM VEÍCULO FORA DE ESTRADA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Programa de Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Maxime Montoya

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Cantalice, Guilherme Santiago Mendes.

Aplicação da metodologia RCA para reprojeto de redutor planetário de veículo fora de estrada / Guilherme Santiago Mendes Cantalice. - Recife, 2023.

p.49 : il., tab.

Orientador(a): Maxime Montoya (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, , 2023.

1. Trem de Engrenagens Planetário. 2. Análise de Causa Raiz RCA. 3. Transmissão Automotiva. 4. Rolamentos. 5. Porta-satélites. 6. 5 Porquês. I. Montoya, Maxime. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2

Ao 29.º dia do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e três, às 10:00 horas, de forma virtual através da plataforma google meet, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Aplicação da metodologia RCA para reprojeto de um redutor planetário em um veículo fora de estrada**, elaborado pelo aluno **Guilherme Santiago Mendes Cantalice**, matrícula 20160006898, composta pelos avaliadores Prof. **Maxime Montoya** (orientador), Prof. **Adson Beserra da Silva** (avaliador) e Prof. **Marcus Costa de Araújo** (avaliador). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua aprovação, atribuindo-lhe a média oito e meio (8,5), julgando-o apto(X) / inapto() à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador: Prof. Maxime Montoya

Nota: 8,5

Assinatura _____

Avaliador Interno: Prof. Adson Beserra da Silva

Nota: 8,5

Assinatura _____

Avaliador Interno: Prof. Marcus Costa de Araújo

Nota: 8,5

Assinatura _____

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCUS COSTA DE ARAUJO
Data: 06/10/2023 09:16:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Recife, 29 de setembro de 2023.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

Dedico este trabalho aos meus pais José Ramon e Maria Helena, a quem tudo devo, que tudo me ensinaram e proporcionaram, do amor, à educação e ao caráter.

AGRADECIMENTOS

Agradeço antes de tudo a Deus, por me dar a vida, por sempre me permitir alcançar meus sonhos e objetivos, por sempre me abençoar e por estar comigo em todas as horas. Grato sou por todas as conquistas que o Senhor me permitiu.

Agradeço aos meus pais José Ramon e Maria Helena por todo o amor, por sempre me ensinarem, sempre me incentivarem e fomentarem meu desenvolvimento, tanto no âmbito acadêmico quanto no pessoal, por me ensinarem que antes de tudo há valores, nunca me deixando esmorecer e nunca fazendo menos do que o melhor possível por seus filhos. Grato sou por ter o privilégio de lhes ter como pais.

Agradeço à minha melhor amiga, a minha companheira de jornada, a minha querida esposa Rísia Débora, por sempre confiar e nunca desistir de nós e de nossos sonhos, por me compreender e me completar. Grato sou por todas as alegrias e aprendizados que vivemos juntos, que o Senhor possa nos abençoar sempre.

Agradeço à minha amada irmã Clara, a quem sempre pude ter o prazer de dividir os aprendizados e alegrias da vida, por sempre poder contar, por trelar comigo.

Agradeço a todos os familiares, tios e tias, primos e primas, avôs e avós, de quem sempre recebi o amor. Hoje caminho pois um dia aprendi com vocês.

Agradeço e a todos os bons e esforçados professores pelos quais tive a chance de aprender, sendo os meus pais os primeiros. Agradeço em especial ao professor Maxime Montoya que sempre se fez disponível e sempre nos ensinou além das palavras, através do exemplo, tanto no desenvolvimento dos trabalhos na Equipe Manguê Baja quanto agora neste trabalho. Agradeço à UFPE e à Equipe Manguê Baja, a todos os seus bons e esforçados membros por fazerem parte do meu desenvolvimento pessoal e acadêmico. Vamo Manguê Baja!

Agradeço a todos os amigos com quem tive o prazer de celebrar a vida, de crescer e aprender, com quem pude dividir os momentos da vida com alegria.

Agradeço a todos os que puderam contribuir com meu desenvolvimento, com quem pude aproveitar os bons momentos da vida, aos que me tornaram e ensinaram a ser quem sou.

“Se vi mais longe foi por que estive sobre
ombros de gigantes.”

Isaac Newton

“Trago as luzes dos postes nos olhos [...]”

Chico Science

RESUMO

O trem de engrenagens planetárias é um tipo de sistema de transmissão amplamente utilizado no cotidiano, especialmente nos conjuntos de transmissão automáticas dos veículos automotores por permitirem, versatilmente, que um mesmo trem de engrenagens tenha mais de uma velocidade de saída do conjunto em um reduzido espaço físico axial. O presente estudo trata de um estudo de caso de um redutor de velocidades do sistema de transmissão do protótipo automotor fora de estrada da equipe Mangue Baja SAE da UFPE, que utilizou um trem de engrenagens planetário, e veio a falhar no seu período de validação. Dessa forma um estudo de análise de causa raiz (RCA) do problema foi realizado com o emprego das ferramentas dos 5 porquês e da árvore de falhas. A aplicação da ferramenta de RCA, foi possibilitada com a desmontagem do redutor de velocidades e, o registro da avaliação do estado de todas as peças e partes desse redutor de velocidades. A combinação do método dos 5 porquês com o método da árvore de falhas que levaram a identificação das causas raiz da falha do redutor de velocidades do protótipo fora de estrada como sendo a pista interna do rolamento inadequada, e o excesso de liberdade do eixo de suporte dos rolamentos e engrenagens do redutor de velocidades estudado.

Palavras chave: Trem de Engrenagens Planetário, Análise de Causa Raiz RCA, Transmissão Automotiva, Rolamentos, Porta-satélites, 5 Porquês.

ABSTRACT

The planetary gear sets are a widely used type of gear train, especially in the automatic transmission systems of motor vehicles, due to its versatility, allowing a single planetary gear set to provide multiple output speeds, within a limited axial space. During the development of a new gearbox final drive for the transmission system of the off-road prototype for the Mangue Baja SAE team at UFPE, a planetary gear train was employed. However, fail in its gear train occurred during its validation test period. In this way, a root cause analysis (RCA) study of the problem was conducted utilizing the 5 Whys and the fault tree analysis tools. The application of the RCA tools was possible by disassembling the gearbox and recording the assessment of the condition of all parts and components of this gearbox. The combination of the 5 Whys method with the Fault Tree Analysis method led to the identification of the Root Causes of Failure of the off-road prototype's gearbox, as the inadequate inner race of the bearing and the lack of rigidity of the support shaft for the bearings and planet gears of the studied gearbox.

Key words: Planetary Geartrain, Root Cause Analysis RCA, Automotive Transmission, SolidWorks CAD, Bearings, Planet Carrier, 5-why.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1	TRANSMISSÕES	12
3.1.1	Desempenho	14
3.1.2	Classificação das Transmissões.....	18
3.1.3	Tipos de Trem de Engrenagens	19
3.1.4	Considerações de Dimensionamento	23
3.2	ROLAMENTOS.....	25
3.2.1	Aplicações e Seleção	26
3.2.2	Falhas de rolamentos.....	29
3.3	ANÁLISE DE CAUSA RAIZ (<i>ROOT CAUSE ANALYSIS</i> - RCA).....	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1	MÉTODOS	34
4.1.1	Análise de causa raiz da falha – RCA	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	Análise de causa raiz (RCA)	37
5.1.1	Definição do problema e coleta de dados	37
5.1.2	Aplicação ferramentas de RCA	39
6	CONCLUSÕES	43
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

Mobilidade é uma antiga necessidade da humanidade. Há fatores que influenciam a escolha do meio de transporte, um é a satisfação de necessidades objetivas, como o desempenho do transporte e a capacidade de chegar ao destino, outro é a satisfação de necessidades subjetivas, como conforto, conveniência e liberdade de escolha do destino e hora da viagem. A mobilidade individual proposta por veículos automotores também é uma expressão de liberdade enraizada em nossa sociedade. Todas as formas de transporte motorizado, incluindo embarcações e aeronaves, necessitam de transmissões para modular torque e rotação. A ideia de equipar motores com uma caixa de engrenagens para adequar a rotação, torque e potência de saída do motor para os parâmetros desejados de operação datam de mais de 100 anos antes da concepção do primeiro automóvel em 1886 por Karl Benz.

A função da transmissão de um veículo é moldar potência e torque do motor para se adequar ao veículo, à superfície, ao motorista e ao ambiente. Sendo suas quatro principais funções permitir a retirada do veículo do repouso, adequar seu fluxo da potência (converter torque e potência e permitir reversão do deslocamento), permitir transmissão contínua de potência com mínima perda e controlar a modularidade da entrega da potência (LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H. 1999).

Na indústria automotiva são principalmente empregadas hoje quatro tipos de transmissões, a manual, a automatizada, a automática e a continuamente variável (CVT). Cada um desses tipos desempenhará comportamento diferente durante a dinâmica veicular, implicando em aspectos como, consumo de combustível, durabilidade, tempo de resposta do motor às rodas, entre outros (SENAI, 2001/2022).

O trem de engrenagens planetário é um tipo de sistema de transmissão amplamente utilizado no cotidiano, especialmente nos conjuntos de transmissão automáticas, por permitirem, versatilmente, que um mesmo trem tenha mais de uma velocidade de saída do conjunto em um reduzido espaço físico axial.

Trens planetários possibilitam nove combinações de estados de deslocamento em um mesmo conjunto de engrenagens. Isso vem do princípio de a posição da engrenagem anelar, do porta-satélites ou da engrenagem solar poder ser fixada, para atuarem fixos como estrutura e os outros dois componentes podem ambos ser usados como entrada ou saída do conjunto planetário, cada um a seu turno.

Os principais parâmetros da concepção de uma transmissão são sua competitividade técnica e econômica. Transmissões tem um efeito decisivo na confiabilidade, consumo de combustível, facilidade de utilização, segurança rodoviária e desempenho de transporte de automóveis e maquinário industrial. Assim requisitos como confiabilidade, vida útil, baixo grau de ruído, baixo peso, alta eficiência e facilidade de operação são desejados e afetam substancialmente sua competência.

O desgaste prematuro das transmissões e subsequentemente a falha prematura prejudicam a disponibilidade e a eficiência econômica de um carro de passeio ou de carga. É frequentemente ignorado o fato de que um pequeno superdimensionamento da transmissão em relação ao motor pode permitir um enorme ganho na vida útil (LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H. 1999).

O baja é um veículo monoposto fora de estrada composto de um chassi tubular. É utilizado em competições de nível acadêmico promovidos pela SAE, que promove competições como o baja em todo o mundo e em diversas áreas de mobilidade. As competições Baja SAE propõem às equipes o desenvolvimento de veículos atendendo especificações de segurança e desempenho, demandando que os mesmos participem de provas de aceleração, velocidade, tração, superação de obstáculos, manobrabilidade e enduro de resistência, além da defesa dos projetos, com o intuito de desenvolver as habilidades dos engenheiros em formação (STAKE, L., 2020).

A fonte propulsora desses veículos é um motor estacionário de 10hp padronizado para todas as equipes, de forma a não privilegiar equipes com motores mais potentes, mas sim destacar projetos mais eficientes. Peso, confiabilidade e desempenho dinâmico, tanto longitudinal quanto de manobrabilidade e superação de obstáculos, são imprescindíveis para um protótipo de sucesso. Dessa forma o trem de força tem papel crucial no desempenho dos veículos, sendo primordial tanto na dinâmica, como no peso, confiabilidade e robustez dos projetos.

Os protótipos automotores fora de estrada tipo Baja frequentemente utilizam em sua transmissão um câmbio CVT em conjunto com um redutor de velocidades/multiplicador de torque objetivando proporcionar a dinâmica esperada para o veículo. Além do comportamento dinâmico longitudinal é desejado do conjunto propulsor confiabilidade, eficiência, baixos custo e peso.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Esse trabalho teve o objetivo de selecionar um método de análise de Causa Raiz (RCA) na identificação da falha de um redutor de velocidades de um protótipo automotor fora de estrada que utilizou um trem de engrenagens planetário em um de seus estágios.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a anamnese da falha do redutor de velocidades de um protótipo automotor fora de estrada que utilizou um trem de engrenagens planetário;
- Selecionar uma metodologia de análise de falha de causa raiz para identificação da falha de um redutor de velocidades com um trem de engrenagens planetário;
- Aplicar a análise de causa raiz (RCA) selecionada capaz de identificar todas as fontes de falha;
- Identificar a Causa ou as Causas Raiz da Falha do Redutor de Velocidades.

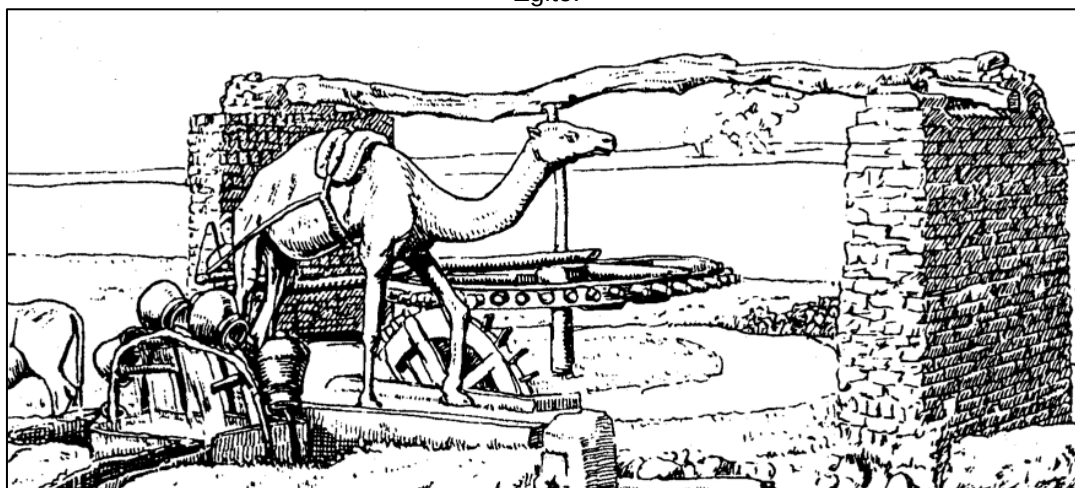
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TRANSMISSÕES

Sistemas com engrenagens foram conhecidamente usados para melhorar a efetividade do trabalho humano. Os primeiros relatos de aplicação vêm do Egito entre 2000 e 1000 AC anos, e ainda, em uso hoje em dia. Trata-se do sistema de engrenagens de Bullock, onde duas peças se conectam por meio de pinos e dentes de madeira, conforme ilustrado na figura 3.1. Nesse sentido, NAUNHEIMER et al. (2011) relatam uma imagem de um carrinho de rodas em um vaso da Mesopotâmia 4000 AC (antes de cristo), como também rodas feitas de dois discos semicirculares de madeira com pneus de couro de 2500 AC.

Os primeiros desenhos de sistemas de engrenagens são da idade média. A força motriz animal era usada na carência de outra fonte mecânica, sendo essa então, a origem das primeiras transmissões veiculares. Na gravura de Albrecht Dürer de um veículo de força animal, por volta de 1500, a limitada propulsão humana pode ser vista sendo convertida em força propulsora através de uma manivela, uma engrenagem cônica e um estágio de engrenagem de dentes retos (LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H. 1999).

Figura 3.1. Gravura mostrando uso de sistema de engrenagens em uma roda de água, em Luxor, Egito.



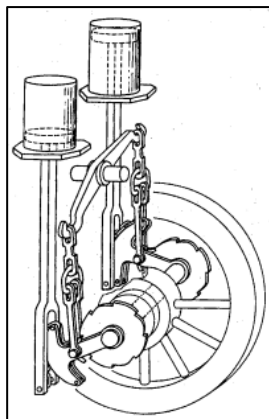
Fonte: NAUNHEIMER et al. (2011)

Com o desenvolvimento das máquinas a vapor tem-se um sistema com uma potência disponível bem mais elevada e, assim, surgiu a necessidade de adaptar a potência disponível dos motores para o trabalho desejado. Ainda no século XIX pôde-

se reconhecer as características de torque e rotação das máquinas a vapor e de combustão interna em veículos, as quais deveriam ser adequadas às necessidades de uso através da utilização de transmissões.

Os primeiros veículos movidos a potência vapor eram movidos por mecanismos de catraca como o ilustrado pela figura 3.2 (LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H. 1999).

Figura 3.2. Mecanismo de catraca utilizado em máquinas a vapor.



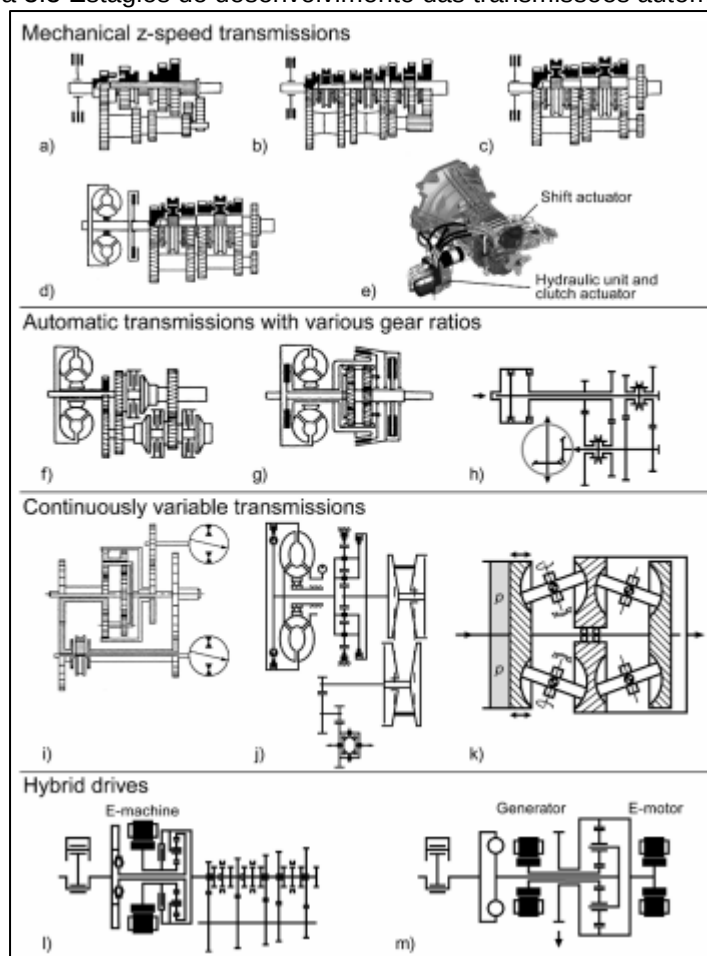
Fonte: Lechner (1999).

Progresso significativo tem sido realizado no desenvolvimento de transmissões automotivas nos últimos 20 anos, Xu et al. (2019), por exemplo aumento da velocidade, expansão da taxa de “spread” e aumento da eficiência e qualidade do câmbio. Na figura 3.3 podemos os estágios de desenvolvimento das transmissões automotivas segundo NAUNHEIMER et al. (2011).

As transmissões automotivas convencionais para motores de combustão interna são classificadas em transmissão automática (AT), transmissão manual automatizada (AMT), transmissão de dupla embreagem (DCT) e transmissão continuamente variável (CVT), apresentando nos últimos 20 anos grande desenvolvimento nas tecnologias de transmissão para os carros de passageiros, Xu et al. (2019); Xu et al. (2017).

Nos dias de hoje, a transmissão automotiva está sofrendo eletrificação, por conta das exigências da legislação referente a redução das emissões de CO₂. Assim, existe um sistema eletromecânico acoplado a veículos híbridos (HEVs) e veículos “plug-in” híbridos (PHEVs), havendo necessidade de acoplamento do motor elétrico (EM) com as transmissões convencionais AT, DCT e CVT. Portanto, desde os primórdios da humanidade até os dias de hoje com os carros elétricos, os sistemas de transmissão automotiva mostram-se essenciais.

Figura 3.3 Estágios de desenvolvimento das transmissões automotivas.



Fonte: NAUNHEIMER et al. (2011).

Como mostra pela figura 3.3, os sistemas de transmissão atuais são os de: a) Transmissão de engate por engrenagem deslizante; b) transmissão de engrenamento contínuo; c) transmissão *synchromesh*; d) transmissão por conversor de torque; e) câmbio manual automatizado "Add-On"; f) transmissão automática de árvore secundária; g) transmissão automática; h) transmissão de embreagem dupla; i) transmissão continuamente variável (CVT) hidrostática com *power-split*; j) transmissão continuamente variável (CVT) mecânica de pratos cônicos; k) CVT toroidal; l) transmissão híbrida 1-E com z-velocidades; m) transmissão híbrida 2-E com *power-split*.

3.1.1 Desempenho

O principal objetivo ao desenvolver uma transmissão, quando aplicado a um veículo de passageiros e comercial, é converter a potência do motor em tração da forma mais eficiente possível, numa ampla faixa de velocidades. Para atingir este

objetivo deve ser encontrado um bom compromisso entre número de marchas, desempenho de subida, aceleração e consumo de combustível para o tipo de veículo ao qual é destinada a transmissão. Avanços técnicos e tecnológicos devem ser levados em consideração em um projeto de transmissão, assim como confiabilidade operacional e vida útil adequada, além de levar em conta considerações socioambientais.

O objetivo funcional da transmissão de um veículo é adaptar a relação de transmissão e o torque exercido nas rodas do veículo às necessidades do motorista considerando as condições de condução. A transmissão de um veículo tem quatro principais funções:

- permitir a retirada do veículo do repouso,
- adequar seu fluxo da potência,
- permitir transmissão contínua de potência com mínima perda
- controlar a modularidade da entrega da potência.

Adicionalmente a essas funções existem outros requisitos auxiliares, também chamados de requisitos operacionais, os quais afetem substancialmente sua competência. Os requisitos auxiliares podem ser destrinchados em:

- confiabilidade de operação,
- custo da transmissão,
- facilidade de reparo,
- facilidade de operação,
- entrega de potência,
- dimensional e peso,
- ajustabilidade
- ambientais (ruídos, fluidos...).

Isso significa especificamente que uma vida de serviço apropriada para o uso desejado (reparabilidade), baixo grau de ruído, baixo peso, alta eficiência e facilidade de operação são requeridos.

O sumário do resultado de pesquisas de mercado realizadas por fabricantes e consumidores categorizando a relevância do desempenho esperado em transmissões de veículos de passeio e comerciais está disponível na seguinte tabela 3.1 (LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H. 1999).

Podemos inferir que as características mais esperadas de uma transmissão são relacionadas com sua durabilidade e confiabilidade, baixos custos de manutenção

e fabricação, e desempenho da mesma.

Tabela 3.1. Resultado de pesquisas de mercado das características desejadas de uma transmissão, em ordem decrescente de importância (10 mais importante, 0 menos).

Requisito	Nota	%	% Cumulativo
Longa vida útil	9	14%	14%
Baixo custo de manutenção	4,89	8%	22%
Baixo custo de fabricação	4,59	7%	29%
Intervalo de relações	4,02	6%	35%
Estágios de transmissão	3,47	5%	41%
Não ocorrência de falha prematuras	3,13	5%	46%
Comprimento	2,92	5%	50%
Longos intervalos de manutenção	2,63	4%	55%
Deslocamento e força de operação	2,59	4%	59%
Baixo peso	2,55	4%	63%
Disponibilidade de tração	2,47	4%	66%
Resistencia a vibração	2,35	4%	70%
Poucas vedações	2,33	4%	74%
Perigo de erro do operador	2,2	3%	77%
Baixo custo de manutenção	2,19	3%	81%
Capacidade de sobrecarga	2,08	3%	84%
Disponibilidade de Overdrive	2,06	3%	87%
Acoplamento de peças consumíveis	1,92	3%	90%
Tipo de troca	1,86	3%	93%
Número de peças	1,58	2%	96%
Tempo de desmontagem e troca	1,5	2%	98%
Pequena perda de potência	1,22	2%	100%

Fonte: Adaptado de Lechner (1999).

Segundo Mordor-Intelligence (2023) 90% dos veículos em uso atualmente tem um motor de combustão interna. Apesar de vantagens como alta relação peso-potência e relativamente boa eficiência, os motores de combustão apresentam as desvantagens de ser incapaz de produzir torque a partir do repouso (rotação do motor nula), apenas apresentar máximo torque e potência em rotação específica e sua eficiência ser extremamente dependente da rotação de operação do mesmo.

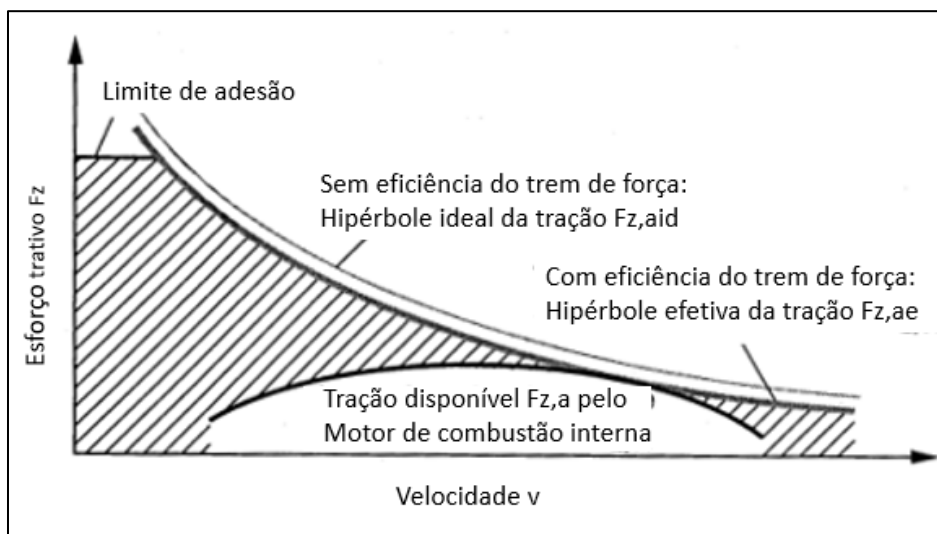
Com a potência máxima disponível no eixo de saída do motor P_{max} e a velocidade de cruzeiro v , a assim denominada hipérbole de tração ideal $F_{Z,Aid}$ e a hipérbole de tração efetiva $F_{Z,Ae}$ podem ser calculadas pelas seguintes equações.

$$F_{Z,Aid} = \frac{P_{max}}{v} \quad e \quad F_{Z,Ae} = \frac{P_{max}}{v} \eta_{tot}$$

sendo η_{tot} é a eficiência total do sistema.

Assim se a potência em plena carga do motor estiver disponível durante toda a faixa de operação do motor pode-se obter a hipérbole de tração da figura 3.4, onde também pode-se ver o perfil de tração e a máxima tração disponível. Assim a máxima tração entre o pneu e a pista é limitada pelo limite de adesão.

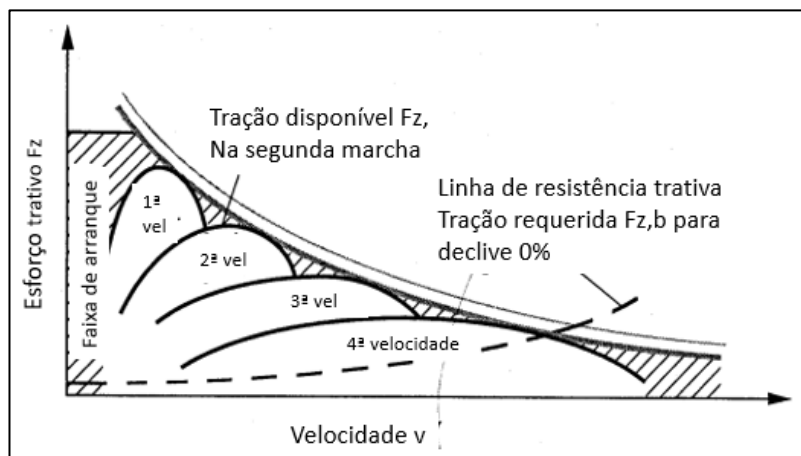
Figura 3.4. Gráfico de limite de adesão, potência e hipérbole de tração efetiva.



Fonte: Adaptado de Lechner (1999).

A partir de toda área hachurada, o limite de tração disponível, fica nítido que o motor de combustão interna não consegue fazer pleno uso da tração disponível. Como ilustrado pelo gráfico da figura 3.5, que mostra a capacidade quando ao motor de combustão se acoplado a um sistema de transmissão multivelocidades (LECHNER, G. 1999), um sistema de transmissão com o intuito de conversão de velocidade, torque e potência se faz necessário para um uso mais eficiente. O uso de um conversor de saída, ou seja, de uma transmissão, reduz a área dos estados de condução impossíveis, permitindo uma aplicação mais eficaz da potência do motor. A figura 3.5 mostra que o aumento do número de velocidades melhora a precisão na representação da hipérbole.

Figura 3.5. Hipérboles de tração de motor de combustão combinado a transmissão de 4 marchas.



Fonte: Adaptado de Lechner (1999).

3.1.2 Classificação das Transmissões

Segundo Lechner uma maneira sistemática de classificação das transmissões pode ser tida como trazido pela tabela 3.2.

Tabela 3.2. Classificação sistemática dos tipos de transmissão.

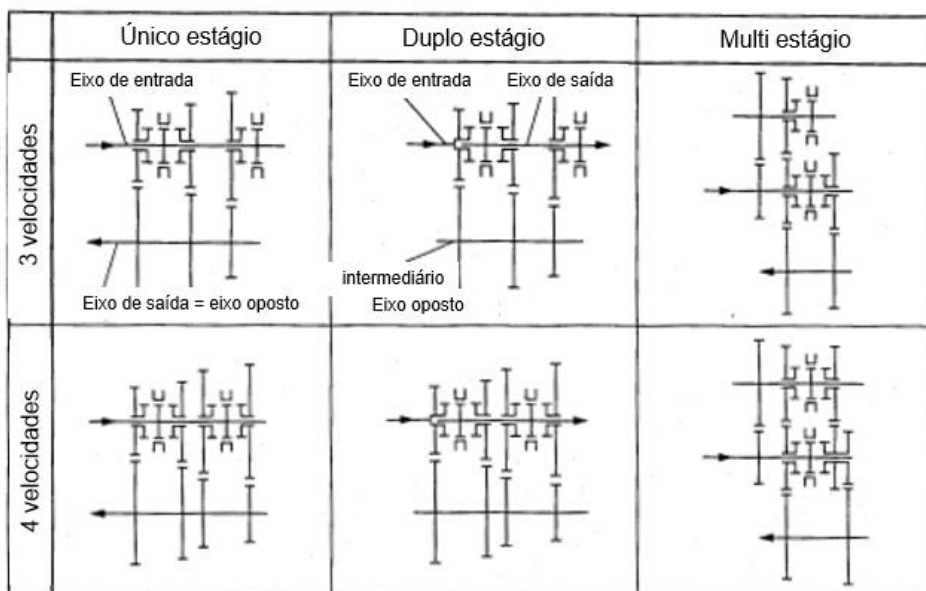
Tipos de Transmissão									
Transmissões com número finito de marchas						Transmissões continuamente variáveis			
Engrenamento constante	Syncromesh	Semi automáticas	Automáticas syncromesh	Automática convencionais	Dupla embreagem	Polias	Toroidal	Hidrostática	Elétrica
Com interrupção de potência				Sem interrupção de potência					
Operada por embreagem			Partida continuamente variável						
Troca manual		Semiautomática	Troca Automática			Conversão automática de torque e potência			

Fonte: Adaptado de Lechner (1999).

Transmissões também são categorizadas pelo seu projeto técnico quanto ao número de etapas que constituem os trens de engrenagens e podem ser classificadas como de estágio simples, de duplo estágio e de múltiplo estágio. O termo estágio se refere aqui a um par de engrenagens, ou ao fluxo de potência de uma roda dentada a outra. Um estágio geralmente envolve fluxo de potência de um eixo para outro. A figura 3.7 ilustra configurações de 3 e 4 velocidades com diferente número de estágios (LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H. 1999).

Numa transmissão de um estágio a transmissão de potência passa por apenas um conjunto de relação de transmissão, ou seja, por um par de engrenagens ou um conjunto pinhão coroa, de forma que a relação de transmissão é modificada apenas uma única vez entre a entrada e a saída da transmissão. Na figura 3.7 podemos ver no quadro superior esquerdo que a potência entra no eixo primário, onde todas as engrenagens primárias estão acopladas solidariamente ao eixo primário, e a potência sempre passa para o eixo secundário através de apenas um par de engrenagens, para cada uma das velocidades. No quadro superior intermediário temos uma transmissão de dois estágios, onde o caminho da potência é sempre iniciado no eixo primário, que é coaxial ao de saída, mas não acoplado, passa ao eixo oposto, intermediário, pelo primeiro par de engrenagens e então segue para o eixo de saída através de um segundo par de engrenagens, de forma que a relação de transmissão final da caixa sempre é composta por duas relações de transmissões, configurando os dois estágios. Equivalentemente acontece para um maior número de estágios, onde cada estágio é responsável por uma relação de transmissão.

Figura 3.7. Representação de estágios de transmissão.

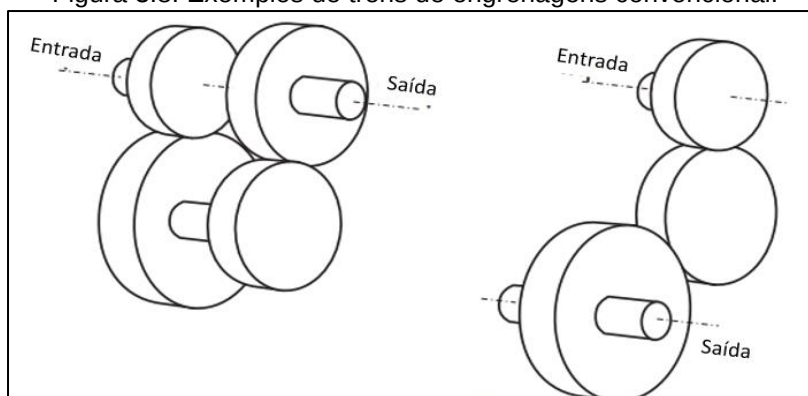


Fonte: Adaptado de Lechner (1999).

3.1.3 Tipos de Trem de Engrenagens

Trens de engrenagens podem ser divididos também como em trens de engrenagens simples, ou convencionais, e em trens planetários, sendo o primeiro o mais corriqueiro par de engrenagens, como representado na seguinte figura 3.8.

Figura 3.8. Exemplos de trens de engrenagens convencional.

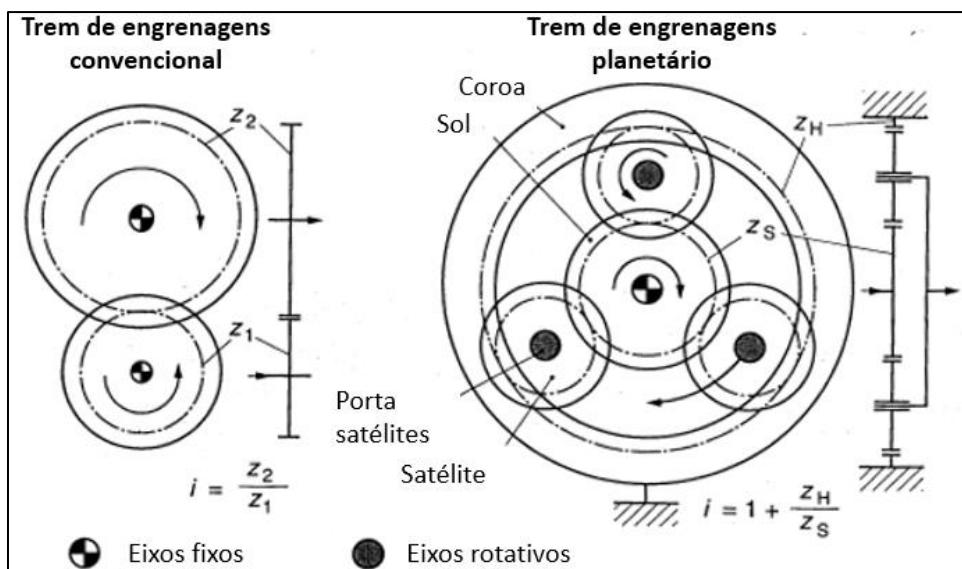


Fonte: Adaptado de Fisher (2015).

A multiplicação de torque no trem de engrenagens convencional funciona pelo princípio da multiplicação de força por um braço de alavanca. Engrenagens de diâmetros diferentes causam a multiplicação do torque. No ponto de contato de duas engrenagens ambas possuem mesma velocidade tangencial, e quando possuem raios distintos giram a velocidades angulares diferentes já que possuem a mesma velocidade tangencial, assim modificando a velocidade de rotação entre os eixos de entrada e saída, bem como o torque.

A relação de transmissão em um trem de engrenagens planetário, ou epicicloidial, funciona de maneira mais complexa, pois este é composto por um conjunto de engrenagens em que se for variada a forma como os componentes do trem são fixados ou liberados é possível obter-se diferentes relações de transmissão. Na figura 3.9 vemos um trem simples ao lado de um trem planetário.

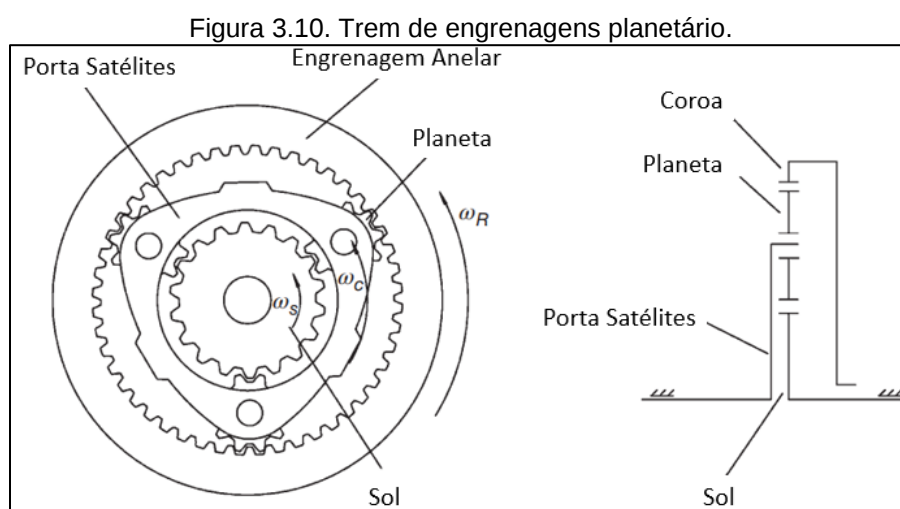
Figura 3.9. Comparativo de trens simples e planetários



Fonte: Adaptado de Lechner (1999).

No trem planetário a engrenagem central, denominada sol, transmite às engrenagens que a rodeiam, os planetas ou satélites, que se engrenam também à engrenagem mais externa denominada de anelar, ou coroa. Os planetas são conectados entre si pelo porta-satélites, no qual estão suportados os eixos nos quais as engrenagens-satélite são montadas através de rolamentos. Os eixos de rotação das engrenagens satélites assim giram em torno do eixo principal da transmissão, eixo de rotação do sol e porta satélites. A saída em um trem planetário é axial, diferente de um trem convencional, onde a entrada e a saída não são coaxiais.

Os estágios de engrenagens planetárias desempenham o papel fundamental na transmissão de energia na maioria das transmissões automáticas. Além disso, são comumente empregados em transmissões continuamente variáveis para operações de reversão, como a representação das marchas a ré, e também têm aplicação como diferenciais. Esses estágios de engrenagens planetárias são, igualmente, o componente central em dispositivos de distribuição de potência, como é observado, por exemplo, em veículos híbridos (Fischer, 2015).



Fonte: Adaptado de Zang e Mi (2018).

3.1.3.1 Trem de Engrenagens Planetário

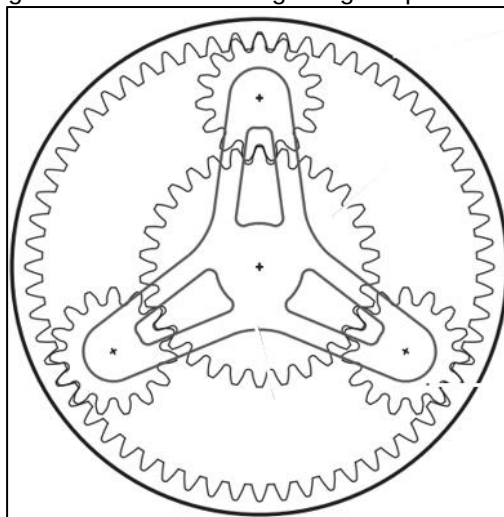
Em um conjunto de engrenagens planetárias simples ilustrado na Figura 3.10, encontramos quatro componentes principais: a engrenagem solar, a engrenagem planetária, a engrenagem anelar e o suporte. O número de engrenagens planetárias não afeta a cinemática, mas em transmissões automáticas é comum utilizar várias engrenagens planetárias, geralmente quatro, para distribuição de carga. Tanto a engrenagem solar quanto a engrenagem anelar giram em torno do mesmo eixo. A

engrenagem planetária realiza duas rotações: uma em torno de seu próprio eixo e outra em torno do eixo da engrenagem solar (Zang e Mi, 2018).

Em um trem de engrenagens planetárias, o número de planetas influencia a distribuição de carga e o desgaste das engrenagens. Um maior número de planetas melhora a distribuição de carga, reduzindo o desgaste. Isso assegura que a força e o torque sejam compartilhados uniformemente, minimizando desgaste prematuro e riscos de falhas. Com mais planetas, cada um carrega uma parcela menor da carga total, distribuindo-a de forma mais equitativa. Além disso, um maior número de planetas pode aumentar a eficiência da transmissão, reduzindo perdas por atrito e desgaste em cada engrenagem. Portanto, em transmissões automáticas, é comum usar várias engrenagens planetárias para melhorar a distribuição de carga e garantir operação confiável e durável.

O trem de engrenagens planetário, figura 3.11, é um mecanismo onde há sempre ao menos três engrenagens planetas, ou satélites, em uma aranha, ou porta satélites, de forma a proporcionar carregamento uniforme e menores tensões nas engrenagens, já que entre os estágios o contato não está restrito a apenas um ponto, mas a um número de pontos igual ao número de satélites. Também as engrenagens não são submetidas a um esforço fletor tão grande quanto num trem simples, já que sempre estão em contato com uma outra engrenagem na direção oposta.

Figura 3.11. Trem de engrenagens planetário.

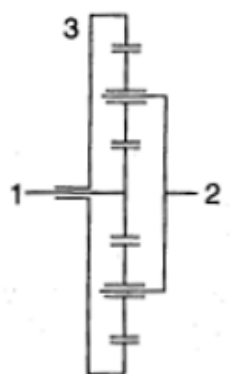


Fonte: Fischer (2015).

O número de satélites e o número de dentes destes não tem nenhum impacto na relação de transmissão, a mesma sendo relacionada ao número de dente entre o sol e a coroa e de como o conjunto está fixado. Ao alterar o elemento fixo e os

elementos responsáveis para a saída e entrada de potência do sistema, é possível obter 6 configurações diferentes, como apresentado na fig. 3.12, e a relação de transmissão depende da configuração selecionada e do número de dentes na engrenagem solar e anelar. Isso possibilita que ao variar o arranjo de fixação do conjunto se obtenha diferentes relações de transmissão em um mesmo trem.

Figura 3.12. Estados possíveis de trens planetários.



Estado de movimento	Tipo	Entrada	Saída	Fixo	Relação intermediária
a)	Trem com eixos fixos	1	3	2	$i_P = \frac{n_1}{n_3} = i_S = -\frac{z_3}{z_1}$
b)		3	1		$i_P = \frac{n_3}{n_1} = \frac{1}{i_S} = -\frac{z_1}{z_3}$
c)	Transmissão planetária de única entrada	1	2	3	$i_P = \frac{n_1}{n_2} = 1 - i_S = 1 + \frac{z_3}{z_1}$
d)		2	1		$i_P = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{1 - i_S} = 1 + \frac{z_3}{z_1}$
e)		2	3	1	$i_P = \frac{n_2}{n_3} = \frac{1}{1 - \frac{1}{i_S}} = 1 + \frac{z_1}{z_3}$
f)		3	2		$i_P = \frac{n_3}{n_2} = 1 - \frac{1}{i_S} = 1 + \frac{z_1}{z_3}$

1 . Sol
2 . Porta Satélites
3 . Coroa

Fonte: Adaptado de Lechner (1999).

3.1.4 Considerações de Dimensionamento

A confiabilidade da transmissão requer minucioso cálculo e análise no estágio de projeto. Ela deve ser concebida ciente de que uma transmissão é um sistema com componentes que tem confiabilidade crítica. Componentes como engrenagens, eixos e rolamentos podem ser dimensionados usando normas como AGMA e ASME. Outros componentes como retentores e vedações ainda são um tanto mais difíceis.

Desgaste prematuro e subsequentemente falha prematura prejudicam a disponibilidade e a eficiência econômica de um veículo. É frequentemente ignorado o fato de que um pequeno superdimensionamento da transmissão em relação ao motor pode permitir um enorme ganho na vida útil. Superdimensionar a transmissão em 15% dobra sua vida útil, embora o custo aumente de 15%, em primeira aproximação.

Valores comumente adotados pela indústria automotiva são listados na tabela 3.3 para vida útil, a mais importante característica de desempenho de uma transmissão. Vida útil B10 se refere a vida útil com confiabilidade de 90%, quando

seguidas as recomendações de manutenção do fabricante. Transmissões de carros passeio requerem uma vida B10 superior a 150.000km, já a de veículos comerciais são tanto maiores, como ilustrado.

Tabela 3.3. Expectativa de vida útil B10 para transmissões.

Condições de operação	Vida útil B10 em Km
Carros passeio	≥150.000
Caminhões	
Uso comercial (dentro ou fora de estrada)	≥300.000
Tráfego urbano (anda e para)	≥400.000
Longas Distâncias	≥800.000

Fonte: Adaptado de Lechner (1999).

Um fator que desempenha relevante papel no carregamento de um conjunto de transmissão é o perfil de carregamento aplicável para velocidades individuais. Isso depende do perfil de rodagem, carregamento do veículo e estilo de direção. Uma classificação quanto ao tipo de motorista pode ser feita como exemplificado na tabela 3.4.

Tabela 3.4. Caracterização do tipo de operação do veículo.

Tipo de motorista	Percentual de quilômetros percorridos			
	Estrada	Cidade	Trânsito urbano	Pistas montanhosas
Auto estrada	70	14	13	3
Estrada interurbana	30	56	11	3
Urbano	30	23	45	2
De área montanhosa	40	30	20	10

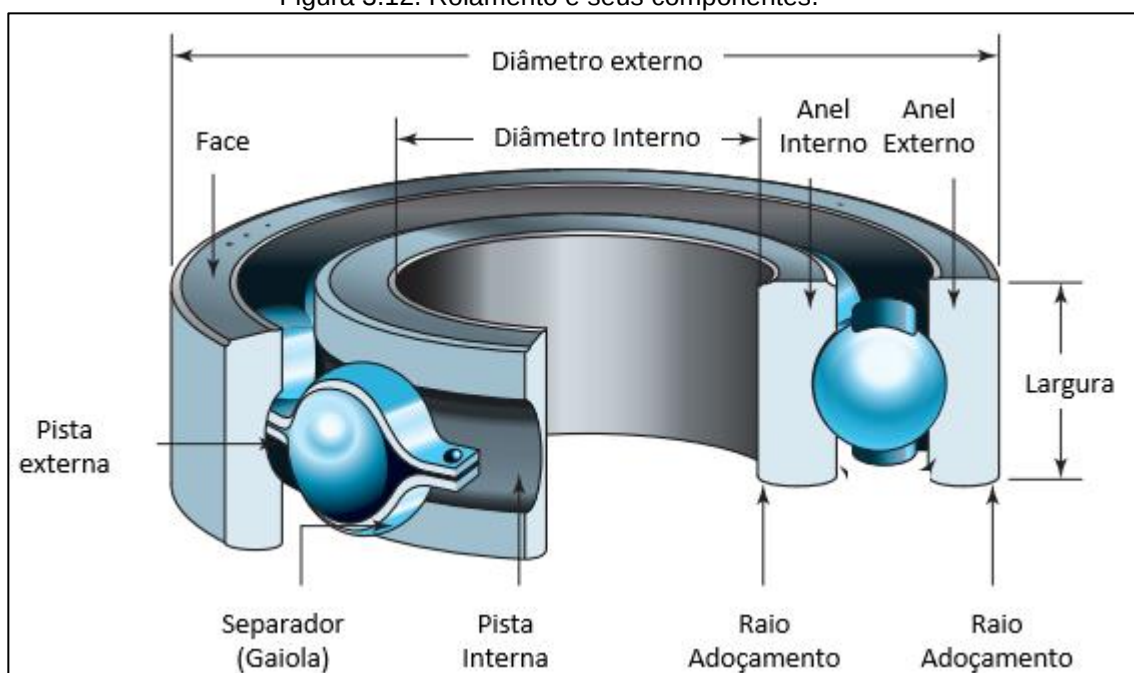
Fonte: Adaptado de Lechner (1999).

Os padrões de carregamento são determinados por testes de campo e de simulações computacionais podem ser traduzidas em ciclos de carregamento utilizado métodos adequados e a vida útil é então comumente estimada utilizando a hipótese de acúmulo de danos de Miner e Haibach (LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H. 1999). Os padrões de carregamento são determinados considerando a aplicação específica, tipo de veículo e padrões de condução. Inicialmente, são coletados dados estatísticos e de uso que descrevem os tipos de cargas típicas e extremas que a transmissão pode enfrentar. A partir desses dados, são definidos casos de carregamento representativos de diversas situações de operação. Utilizando simulações computacionais, aplica-se virtualmente esses casos para calcular os esforços e cargas nos componentes da transmissão.

3.2 ROLAMENTOS

Os rolamentos são componentes mecânicos fundamentais usados para reduzir o atrito e facilitar o movimento rotativo entre peças em máquinas e equipamentos. Consistem em anéis internos e externos com pistas circulares onde elementos rolantes, como esferas ou rolos, movem-se, distribuindo as cargas e minimizando o atrito. Esses elementos rolantes são separados e mantidos em posição por uma gaiola. A lubrificação é frequentemente aplicada para reduzir o desgaste e o calor gerado durante a rotação. A redução do atrito proporcionada pelos rolamentos resulta em maior eficiência energética, menor desgaste e maior vida útil dos componentes, sendo essenciais em uma ampla gama de aplicações industriais e comerciais. A figura 3.12 representa um rolamento e seus componentes.

Figura 3.12. Rolamento e seus componentes.



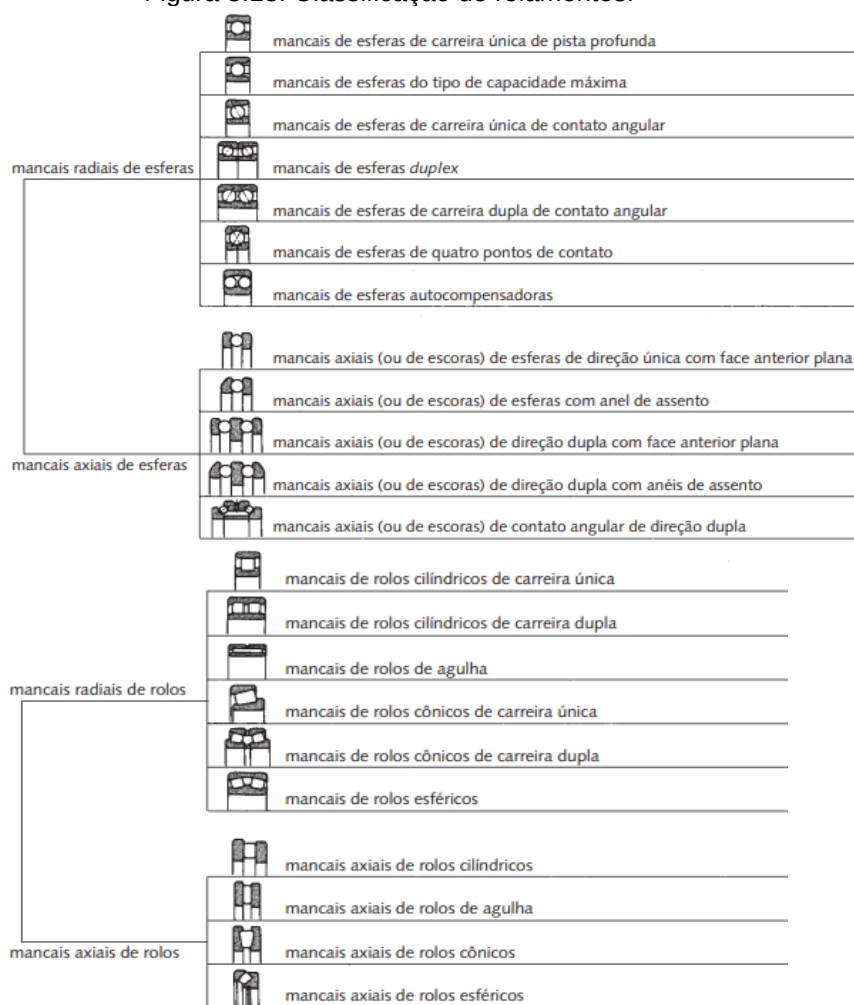
Fonte: Adaptado de Budynas (2020).

Rolamentos podem ser empregados em diversos tipos de máquinas que necessitem de aplicação de uma carga em rotação. Os rolamentos de contato rolante fazem parte de uma categoria de mancais onde a carga principal é transferida por elementos em contato de rolamento, não de deslizamento. Nesse tipo de rolamento, o atrito inicial é cerca do dobro do atrito durante o funcionamento, porém é mínimo em comparação ao atrito inicial de um mancal de deslizamento. A carga, velocidade e a viscosidade do lubrificante em uso

influenciam o atrito e o desempenho desse rolamento (BUDYNAS; NISBETT, 2008).

Encontram-se disponíveis no mercado rolamentos com características específicas para se adequar a cada tipo de projeto, suportando cargas axiais, radiais ou uma combinação delas. Destaca-se o uso de rolamentos fixos de uma carreira de esferas para utilização de carga radial e axial moderadas (NSK, 2011). Uma lista de tipos de rolamentos pode ser observada na seguinte figura 3.13.

Figura 3.13. Classificação de rolamentos.



Fonte: Norton (2013).

3.2.1 Aplicações e Seleção

Na seleção e aplicação de rolamentos é necessário considerar seu carregamento, velocidade de rotação, facilidade de montagem, remoção, tipo de lubrificante e lubrificação. Existem requerimentos de máxima rotação, temperatura de operação, folgas e tolerâncias a depender da aplicação (LECHNER, G.;

NAUNHEIMER, H. 1999). A seleção de um rolamento envolve considerar a carga e sua direção, a velocidade de operação, dimensões, tipo de rolamento, carga estática e dinâmica, ambiente operacional, lubrificação, requisitos de manutenção, disponibilidade, custo, histórico de desempenho e conformidade com normas da indústria. Esses critérios garantem a escolha correta para uma aplicação específica, assegurando eficiência, durabilidade e funcionamento ideal do sistema. Esses componentes devem ser projetados para se adequar a um espaço com dimensões especificadas e para suportar uma carga com características definidas. Por último, esses componentes devem ser projetados para ter uma vida útil satisfatória quando operados nas condições estabelecidas (BUDYNAS; NISBETT, 2020).

Para o correto desempenho em operação, é fundamental levar em consideração o local de aplicação dessas cargas rotativas, a fim de não ocasionar deslizamento entre as partes. A folga ou interferência utilizada é determinante para estabelecer o método mais adequado de montagem do rolamento em cada caso. A montagem se dá com inserção do anel externo do rolamento no alojamento, e a inserção de um eixo em seu anel interno (OLIVEIRA, G., 2019).

Os tipos mais comuns de rolamento para eixos em transmissões veiculares são os de esferas de sulco profundo, de quatro pontos, de esfera angular e de rolos cilíndricos. Os de esferas do tem grande aplicação devido a sua perpendicularidade, compactos e baixo custo (LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H. 1999).

3.2.1.1 Vida do rolamento

A vida útil de um rolamento é um conceito fundamental, pois representa a expectativa de quanto tempo um rolamento pode operar de forma confiável antes que ocorram falhas devido à fadiga do material. Esta medição é crucial para garantir a eficiência, confiabilidade e segurança dos sistemas mecânicos nos quais os rolamentos são aplicados.

A vida útil de um rolamento é medida pelo número de rotações ou horas de uso a uma velocidade constante até que ocorra falha por fadiga, caracterizada pelo desprendimento das superfícies de suporte da carga. Esse termo refere-se a essa medida, sendo crucial para garantir a eficiência e a confiabilidade do rolamento. Durante o movimento das esferas ou rolos, ocorrem tensões de contato no anel interno, no elemento rolante e no anel externo. Em condições ideais de limpeza,

lubrificação, montagem adequada e operação em temperaturas razoáveis, a fadiga do metal é a única razão para falha.

Segundo a ABMA (Associação Americana de Fabricantes de Rolamentos) a vida útil nominal L_{10} é o número de rotações (ou horas) que 90% de um grupo de rolamentos alcança ou excede antes da falha. Geralmente, usa-se a vida útil nominal de 10^6 rotações, mantida por tradição, sendo baixa quando se considera a qualidade atual dos rolamentos. (BUDYNAS; NISBETT, 2020).

O cálculo da vida L_{10} é baseado em uma equação que considera a carga dinâmica equivalente do rolamento, a carga dinâmica básica do rolamento (C), e os coeficientes de vida L_{10} (normalmente denotados por "a" e "b") associados ao tipo e à geometria do rolamento.

A fórmula típica para calcular a vida L_{10} é:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^a \times b$$

onde:

- L_{10} é a vida nominal em milhões de revoluções (ou horas),
- C é a carga dinâmica básica do rolamento,
- P é a carga dinâmica equivalente aplicada ao rolamento,
- a e b são coeficientes específicos de cada tipo de rolamento.

Esses coeficientes são determinados empiricamente e estão relacionados à confiabilidade desejada para o rolamento. Eles podem variar com o tipo de rolamento (esferas, rolos, etc.) e a aplicação específica.

Para realizar comparações da vida útil de um rolamento em diferentes condições de carregamento foi feito um estudo onde grupos nominalmente idênticos são testados até o critério de falha de vida em diferentes cargas, e seus dados são tratados e através de uma regressão é possível chegar à seguinte equação, que relaciona a carga F à vida L_{10} .

$$FL^{1/a} = cte.$$

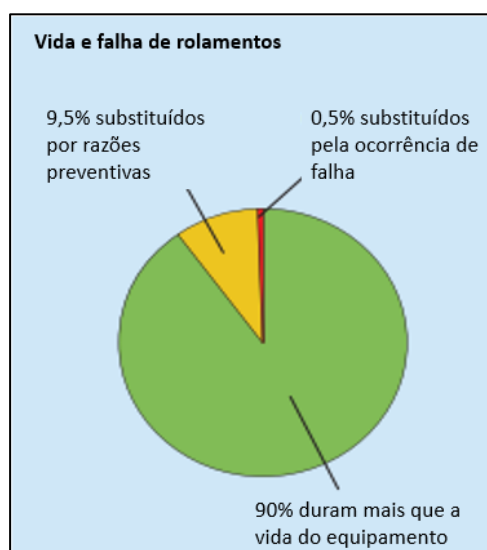
Onde a é igual a 3 para rolamentos de esfera e igual a 10/3 para rolamentos de rolos (BUDYNAS; NISBETT, 2020).

Fazendo a comparação das condições requeridas de carga e vida do projeto com as oferecidas pelos fabricantes através dessa equação e de suas derivações pode-se fazer uma conversão e assim verificação da aplicabilidade dos rolamentos disponíveis para as características do projeto.

3.2.2 Falhas de rolamentos

Apenas uma pequena fração de todos os rolamentos em uso atualmente falham, figura 3.14. A maioria, 90%, deles duram a vida do equipamento em que estão instalados. 9,5% dos rolamentos são substituídos antes da falha por motivos de segurança. Aproximadamente 0,5% de os rolamentos são substituídos porque estão danificados ou falharam (SKF, 2017).

Figura 3.14. Distribuição de falhas de rolamentos.



Fonte: Adaptado de SKF (2017).

Existem várias razões pelas quais os rolamentos pode ser danificado ou falhar. De um modo geral, 1/3 falha devido à fadiga, 1/3 falha devido a problemas de lubrificação (lubrificante errado, quantidade errada, intervalo de lubrificação), 1/6 falha devido a contaminação (vedações ineficazes), 1/6 falha por outros motivos (manuseio e montagem inadequados, peso ou carregamento diferente do previsto, ajustes errados ou inadequados).

Cada um desses eventos produz danos visíveis nos rolamentos, uma marca de dano única, um padrão, como exemplificado na figura 3.15. Assim, examinando cuidadosamente um rolamento danificado, é possível, na maioria dos casos, encontrar a causa raiz do dano. Com base nas descobertas, ações corretivas podem ser tomadas para evitar a recorrência do problema (SKF, 2017).

Figura 3.15. Exemplo de padrão de desgaste das pistas.



Fonte: SKF (2017).

3.3 ANÁLISE DE CAUSA RAIZ (*ROOT CAUSE ANALYSIS - RCA*)

A Análise de Causa Raiz é um procedimento destinado a identificar os elementos que desencadeiam eventos específicos, seguindo uma abordagem metodológica e empregando técnicas específicas que direcionam o foco na detecção e solução de problemas.

Cada falha em um equipamento resulta de uma série de motivos interligados. Existe uma clara sequência de ações e suas consequências que culminam em uma falha. A Análise de Causa Raiz é um método passo a passo que conduz à identificação das falhas ou das causas fundamentais. Uma investigação RCA mapeia a progressão descendente de eventos de causa e efeito, rastreando desde a falha final até sua origem raiz (MAHTO e KUMAR, 2008).

A Análise de Causa Raiz (RCA) é o procedimento usado para examinar as conexões entre as causas e os efeitos de um evento, frequentemente associado a resultados indesejáveis. O propósito principal de conduzir uma análise de causa raiz é descobrir uma solução eficaz que assegure a prevenção da recorrência do evento indesejável (SILVA, F. H. C., 2016).

Essa ferramenta ajuda a entender não só os detalhes de como e por que um evento ocorreu, mas também a compreender suas causas. Identificar as razões por trás de uma falha é essencial para implementar correções eficazes e prevenir recorrências semelhantes (ROONEY e HEUVEL, 2004).

A análise de causa raiz envolve uma variedade de técnicas, que abrangem a análise de barreiras, a análise de mudanças, o diagrama de Ishikawa, a análise de Pareto, a construção de árvores de causas, entre outras. Essas técnicas são utilizadas

para mapear a cadeia causal que se origina de um evento final indesejado, com o propósito de identificar sua causa raiz. Além disso, a abordagem desse método não se limita apenas a encontrar as causas fundamentais, mas também se concentra em solucionar o incidente ocorrido, a fim de prevenir a ocorrência de novos eventos semelhantes (TEIXEIRA e CASSIANI, 2010).

Conforme recomendado pelo *U.S. Department of Energy* em 1992, o processo completo de investigação e elaboração de relatórios de causa raiz é composto por cinco etapas. Embora possa haver alguma interseção entre essas fases, é fundamental envidar todos os esforços para mantê-las claramente separadas e distintas. Essas etapas compreendem a coleta de dados, a avaliação, a implementação de ações corretivas, a disseminação de informações e o acompanhamento.

É essencial iniciar a coleta de dados na análise de causa raiz logo após a identificação do evento para garantir a captura completa de informações relevantes. Isso abrange as condições antes, durante e após o evento, as ações do pessoal envolvido, fatores ambientais e qualquer outra informação relacionada à ocorrência.

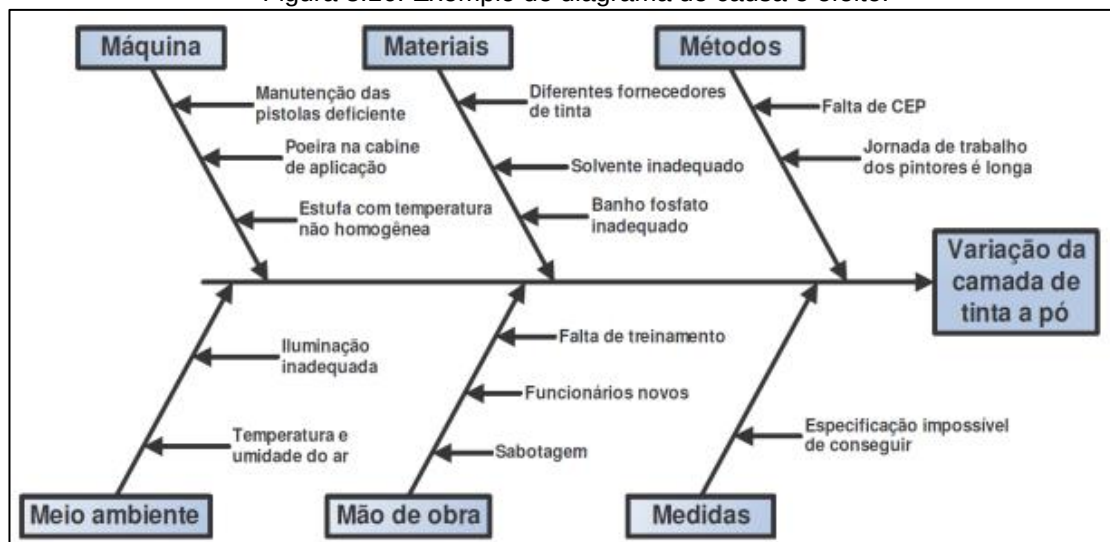
Qualquer método de análise de causa raiz pode ser aplicado, e deve englobar os seguintes passos, identificação do problema, avaliação da relevância do problema, identificação das causas imediatas (condições ou ações) que precederam e cercaram o problema, identificação das razões subjacentes que explicam a existência das causas mencionadas na etapa anterior, retrocedendo até a causa fundamental, que, quando corrigida, impedirá a recorrência dessas e outras ocorrências em todo o contexto. A causa fundamental representa o ponto de término na fase de avaliação.

Um dos métodos empregados na análise de causa raiz é a análise de Pareto, um gráfico de barras que visualiza o impacto de cada um dos eventos em estudo. Priorizam-se inicialmente os eventos que mais contribuem para os problemas. Quando várias causas estão relacionadas a um problema, geralmente uma ou duas delas são responsáveis pela maior parte das questões. Portanto, ao invés de buscar eliminar todas as causas, é prático e eficaz concentrar esforços inicialmente na eliminação da causa principal (PEINADO e GRAEML, 2007).

Outro método utilizado é o diagrama de causa e efeito, também conhecido como diagrama de espinha de peixe ou diagrama de Ishikawa. Este diagrama, ilustrado na figura 3.16, é uma representação gráfica que facilita a identificação, exploração e exposição das possíveis causas de uma situação ou problema

específico. O diagrama de causa e efeito identifica apenas as causas potenciais de uma ocorrência específica, as quais representam suposições que requerem análise e teste individual para confirmar sua validade e determinar seu grau de influência ou impacto sobre a situação sob análise (PEINADO e GRAEML, 2007).

Figura 3.16. Exemplo de diagrama de causa e efeito.



Fonte: PEINADO e GRAEML (2007).

Na resolução de problemas do mundo real no campo da engenharia, são necessárias ferramentas que não se baseiem apenas em estatísticas, mas que também tirem proveito da experiência, sabedoria, conhecimento e discernimento dos membros da equipe. Alguns dos métodos amplamente empregados na engenharia incluem as técnicas dos "5 Porquês", a Análise de Campo de Força e a Técnica de Grupo Nominal, que desempenham um papel fundamental na solução desses tipos de desafios (Besterfield et al. 2012).

De acordo com Ohno (1997), o método dos "5 Porquês" representa uma abordagem significativa que é amplamente utilizada no sistema de Produção da Toyota. Essa técnica visa descobrir a causa raiz de um problema que, frequentemente, está oculta por trás de sintomas aparentemente óbvios. Aguiar (2014), ao avaliar métodos de controle de qualidade adequados para abordar problemas considerados simples em uma organização industrial, destacou o Método dos "5 Porquês", o Diagrama de Ishikawa e a Análise de Barreira de Controle como os mais apropriados.

O método dos 5 porquês é uma técnica de resolução de problemas que consiste em fazer repetidas perguntas "por que?" para identificar a causa raiz de um

problema. Esse método é uma técnica científica aplicada no Sistema Toyota de Produção para descobrir a causa raiz verdadeira de um problema, frequentemente camuflada por sintomas óbvios (Ohno, 1997). Começando com a identificação do problema e avançando através de uma série de "por quês", a técnica busca descobrir a causa subjacente do problema, em vez de apenas tratar seus sintomas. No método dos 5 Porquês, começa-se questionando por que o problema ocorre e continua-se a perguntar "por quê" sucessivamente, baseando cada nova pergunta na resposta da anterior, até encontrar a causa raiz do problema. Isso ajuda a desenvolver soluções mais eficazes e promove a melhoria contínua, garantindo que os problemas sejam resolvidos de maneira mais completa e duradoura.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

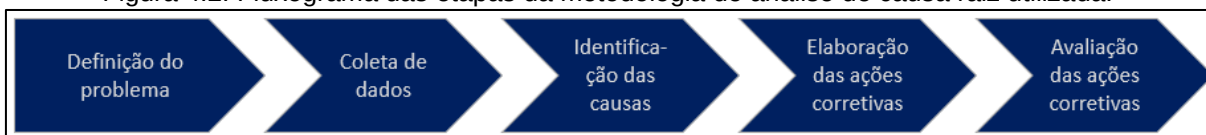
4.1 MÉTODOS

Nesta seção, é apresentada a metodologia utilizada para aplicar a análise de causa raiz (RCA) no projeto mecânico do redutor de velocidades com trem de engrenagens planetárias.

4.1.1 Análise de causa raiz da falha – RCA

Para a análise da falha do redutor da equipe foi utilizada a metodologia de análise de causa raiz, cujas etapas estão ilustradas na figura 4.2, e consideradas na metodologia RCA seguida por esse trabalho.

Figura 4.2. Fluxograma das etapas da metodologia de análise de causa raiz utilizada.



Fonte: Autoria própria.

4.1.1.1 Definição do problema

Constatou-se que o redutor de velocidades da transmissão do protótipo da equipe, composta por uma transmissão continuamente variável em série com um redutor de dois estágios, apresentou falha em seu teste de validação e tornou o veículo imóvel.

4.1.1.2 Coleta de dados

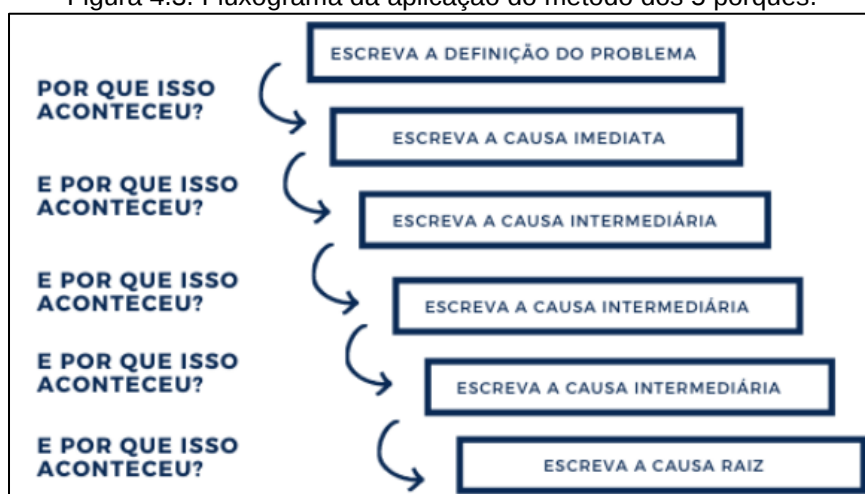
Para avaliação do problema se fez necessário a retirada do redutor do veículo e sua desmontagem, que se deu no laboratório da equipe, etapa documentada fotograficamente. Para acessar o interior do redutor foram desmontadas as capas dos dois estágios, dando acesso tanto ao estágio de redução por corrente, pinhão e coroa por um lado quanto ao estágio do trem planetário de engrenagens por outro. Com as capas retiradas foi possível avaliar o estado dos componentes.

4.1.1.3 Identificação das causas através de ferramentas de RCA

Com as evidências recolhidas na etapa anterior foi então realizada a análise

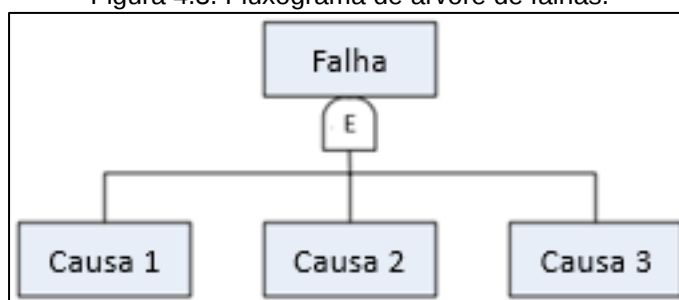
para identificação da causa da falha empregando-se das ferramentas de RCA. A análise iniciou com a realização de um brainstorming para reunir hipóteses sobre as possíveis causas da falha. Em seguida se fez a aplicação do método dos 5 porquês de forma híbrida com a árvore de falhas de maneira a explicitar as causas raízes do problema investigado, uma vez que a metodologia dos 5 porquês é uma análise linear, figura 4.3, não permitindo a possibilidade de haver mais de uma causa para uma falha, daí a combinação desse método com o da árvore de causa e efeito, ilustrada na figura 4.4, se fez eficaz para a conclusão das causas da falha desse trabalho.

Figura 4.3. Fluxograma da aplicação do método dos 5 porquês.



Fonte: Favarão (2023).

Figura 4.3. Fluxograma de árvore de falhas.



Fonte: Adaptado de Vanden Heuvel et al. (2008).

Na análise de causa raiz no projeto do trem de engrenagens planetárias utilizou-se uma câmera fotográfica na coleta de dados para análise de causa raiz que proporcionou um registro visual detalhado das condições e falhas, servindo como evidência visual concreta para apoiar a análise, e auxiliar na identificação precisa das possíveis causas ao mostrar detalhes cruciais. Como também, registrar as informações em áreas de difícil acesso ou que possam representar riscos,

contribuindo para uma análise abrangente e bem fundamentada, essencial para a eficiência e a qualidade na análise.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizado uma Análise da causa raiz (RCA) utilizando o método dos 5 porquês de forma a encontrar a causa da falha do redutor de velocidades com um trem de engrenagens planetário, descrita a seguir.

5.1 Análise de causa raiz (RCA)

5.1.1 Definição do problema e coleta de dados

O redutor de velocidades em desenvolvimento da transmissão do protótipo falhou em seu teste de validação tornando o veículo imóvel após 1 hora e 20 minutos de operação. Foi constatado que o travamento havia se dado no redutor, não sendo possível a rotação de seus componentes e, assim, das rodas trativas do protótipo. Além, o planetário se encontrava significativamente quente.

Para avaliação se fez necessário retirada do componente do veículo para sua desmontagem e, assim, acesso a seus componentes internos. Ao abrir o segundo estágio do redutor, que utiliza um conjunto de corrente pinhão e coroa, não foi encontrado sinal de falha em grau que impedisse a rotação do conjunto, já ao acessar o primeiro estágio, onde o trem planetário se localiza, encontrou-se severos danos.

Figura 5.1. Detalhe dos danos ao porta-satélites e coloração das engrenagens.

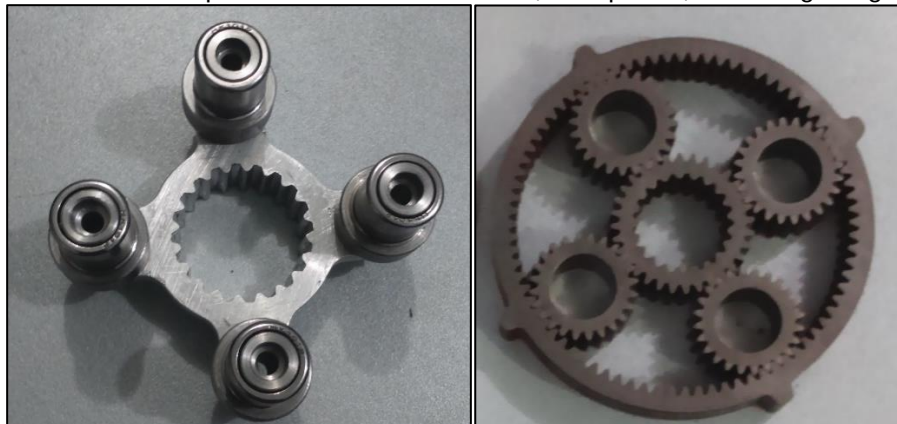


Fonte: Autoria própria.

O porta-satélites encontrava-se com todos os seus braços escoados, evidente na figura 5.1, incluindo pontos onde houvera ruptura do mesmo. As engrenagens satélites encontravam-se todas fora de posicionamento devido ao escoamento do porta-satélites e apresentavam coloração alterada, passando do original acinzentado,

comum aos aços, para uma tonalidade azulada. Notável diferença quando comparado aos seus respectivos estados iniciais, antes da operação, ilustrado pela figura 5.2.

Figura 5.2. Estado inicial do porta-satélites e rolamentos, à esquerda, e das engrenagens, à direita.



Fonte: Autoria própria.

A quantidade do óleo lubrificante do trem planetário se encontrava significativamente menor que a inicialmente abastecida. Havia evidência de presença de vazamento de lubrificante pelas capas para o exterior do redutor, mas num grau pequeno e que não faria o nível diminuir significativamente, não sendo encontrado sinal de vazamento do lubrificante do trem planetário para o estágio da corrente.

Na sequência da desmontagem os conjuntos satélites apresentavam-se com significativo desalinhamento, como evidenciado na figura 5.3, onde se vê extremo desalinhamento do eixo de rotação da engrenagem em relação ao eixo suporte do rolamento, que não deveria existir em grau algum.

Figura 5.3. Desalinhamento do eixo suporte, direção destacada em vermelho, em relação à engrenagem.



Fonte: Autoria própria.

A desmontagem da engrenagem de seus rolamentos, quebrados, evidenciou a condição em que as pistas dos destes se encontravam, ilustrada na figura 5.4 para a

pista externa e na figura 5.5 para os danos na pista interna.

Figura 5.4. Rolamento do conjunto satélite quebrado. Detalhe da pista externa, à direita.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.5. Pista interna danificada após operação.



Fonte: Autoria própria.

5.1.2 Aplicação ferramentas de RCA

Para a identificação das causas raiz da falha empregou-se uma combinação do método dos 5 porquês com o método da árvore de falhas, que culminou no diagrama representado na figura 5.6. A análise iniciou com a aplicação do método dos porquês, até o ponto onde se deparou com a situação de haver mais de uma causa para uma falha e mais de uma falha devido a uma mesma causa, sendo então adotado uma abordagem conjunta do método da árvore de falhas, explicada a seguir.

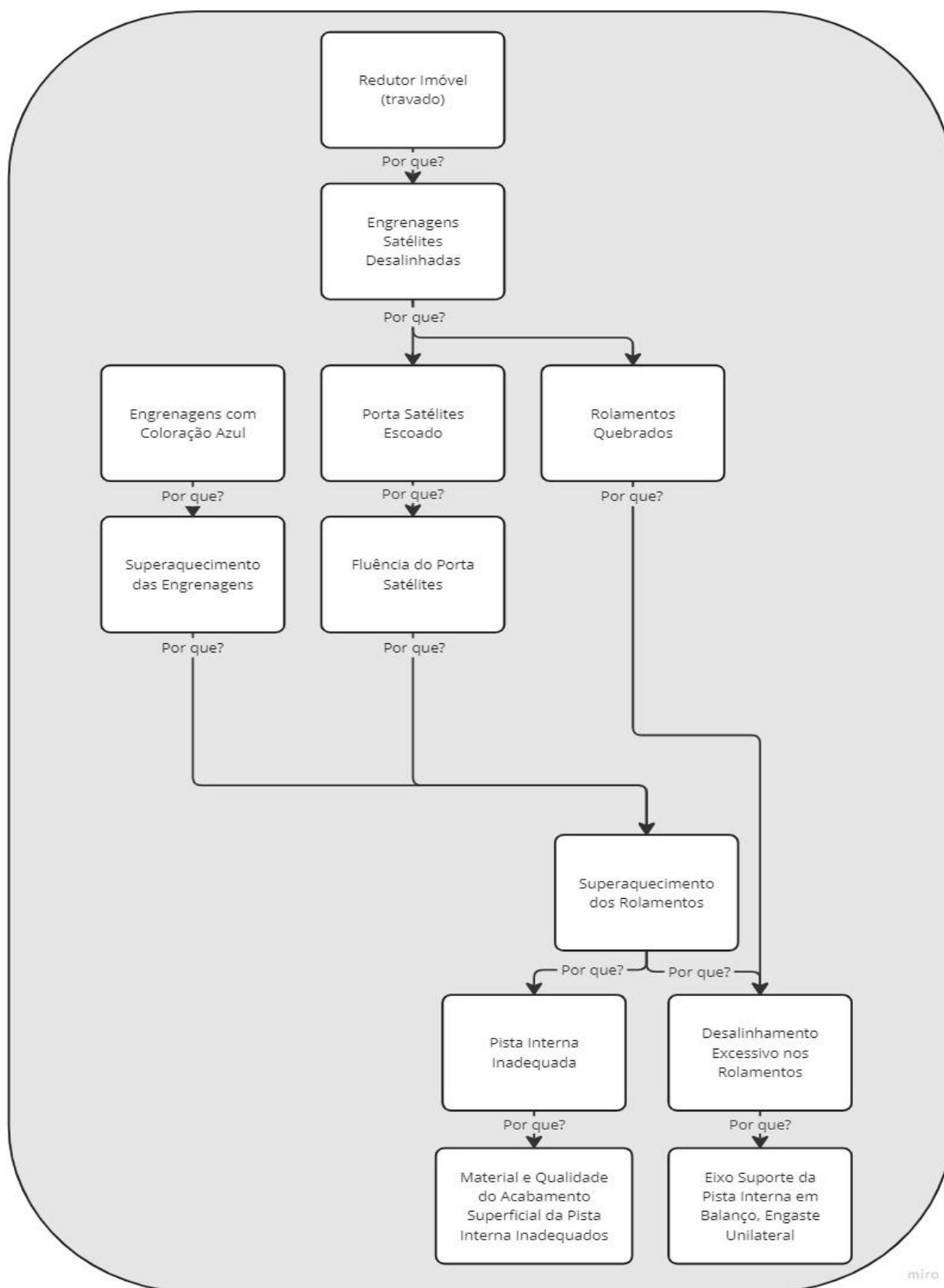
Como evidências haviam os rolamentos quebrados, figura 5.3 e 5.4, suas pistas internas danificadas na figura 5.5, as engrenagens com coloração alterada e o porta-satélites escoado, figura 5.1. Os rolamentos quebrados indicaram que os esforços estavam inadequados aos mesmos devido ao excesso de liberdade dos eixos da pista interna. A coloração das engrenagens evidencia a presença do superaquecimento do sistema. Marcas nas pistas internas dos rolamentos evidenciam que as mesmas não

estavam adequadas à aplicação, não tendo a dureza nem acabamento superficial adequados. Tendo em mãos todos esses efeitos foi então estudado a relação entre eles em busca de suas causas.

O superaquecimento dos rolamentos, que causou o superaquecimento e assim a mudança de coloração das engrenagens, se deu devido aos esforços excessivos e inadequados que ocorreram nos rolamentos. Os esforços excessivos tiveram origem de dois fatores, sendo o primeiro a pista interna que fora de fabricação própria não ter as propriedades adequadas à aplicação e segundo devido ao excesso de liberdade das engrenagens satélite sobre os rolamentos, causando desalinhamento radial torcional excessivo, devido ao eixo suporte dos satélites ser engastado em apenas uma de suas extremidades e ter a outra livre, dando maior possibilidade de flexão ao mesmo. O escoamento do porta-satélites se deu por fluência uma vez que o sistema estava superaquecido, causando diminuição das suas propriedades mecânicas.

Assim foi possível organizar esse racional no diagrama da figura 5.6 que detalha organizadamente quais foram as falhas iniciais e suas respectivas causas nível a nível, até o conhecimento das causas raiz.

Figura 5.6. Diagrama do método dos 5 porquês para a identificação da causa raiz da falha do redutor de velocidades.



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, ficou evidenciado que as causas da falha do redutor de velocidades com engrenagem do tipo planetário do protótipo fora de estrada foram a pista interna do rolamento inadequada, e o excesso de liberdade do eixo suporte dos rolamentos e engrenagens.

A solução apontada para o problema da pista interna foi a escolha de novo rolamento com pista interna já disponibilizada pelo fabricante como parte do rolamento. Para o problema do excesso de liberdade de flexão nos eixos dos satélites a recomendação foi um novo design do porta-satélites com modificações que resultariam no conjunto planetário apoiando os eixos bilateralmente, trazendo estabilidade e rigidez ao conjunto.

6 CONCLUSÕES

Este estudo alcançou seu objetivo geral ao selecionar e aplicar um método eficaz de Análise de Causa Raiz (RCA) para identificação da falha em um redutor de velocidades equipado com um trem de engrenagens planetário em um dos seus estágios. Através da anamnese minuciosa da falha no redutor de velocidades do protótipo automotor fora de estrada e da aplicação criteriosa da metodologia RCA selecionada, foi possível identificar com precisão as fontes de falha e, mais importante, as Causas Raiz subjacentes. Este processo proporcionou uma compreensão aprofundada dos fatores que contribuíram para a falha do redutor, permitindo a implementação de aprimoramentos e correções no projeto para garantir um redutor de velocidades mais confiável e eficiente no futuro. A análise de causa raiz revelou-se uma ferramenta valiosa para a engenharia, fornecendo insights essenciais para aperfeiçoar projetos mecânicos e impulsionar a inovação na área automotiva.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. C. **Análise de causa raiz: levantamento dos métodos e exemplificação.** Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial. 2014.

BESTERFIELD, D. et al. **Total Quality Management: CAP 14, Management Tools.** 3ª ed. Dorling Kindersley (India) Pvt. Ltd. 2012.

BUDYNAS, R. G., NISBETT, J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**, 8ª ed. McGraw Hill. 2008.

BUDYNAS, R. G., NISBETT, J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Design.** 11ª ed. McGraw Hill. 2020.

FAVARÃO, R. **Análise de Causa Raiz, RCA — Root Cause Analysis Ebook.** Apeck. 2023

HEUVEL, L. N. V., LORENZO, D. K., JACKSON, L. O., HANSON, W. E., ROONEY, J. J., WALKER, D. A. **Root Cause Analysis Handbook: A Guide to Efficient and Effective Incident Investigation.** 3ª ed. ABSG Consulting. 2008.

LECHNER, G., NAUNHEIMER, H. S. **Automotive Transmissions- Fundamentals, Selection, Design and Application.** Springer. 1999.

MAHTO, D., KUMAR, A. **Application of root cause analysis in improvement of product.** *Journal of Industrial Engineering and Management*, 16-53. 2008.

MORDOR-INTELLIGENCE. **High-Performance IC Engine Vehicle Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts.** Disponível em: [link](https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/high-performance-ic-engine-vehicle-market#:~:text=In%20the%20case%20of%20automobiles,fuel%20consumption%20and%20GHG%20emissions). Acessado em 31/7/2023 às 9:29.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4^a ed. Bookman. 2013.

OLIVEIRA, G. B. **Análise do aquecimento de um rolamento de esferas para o processo de montagem em uma indústria do setor metalmecânico**. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. 2019.

PEINADO, J., GRAEML, A. R. **Administração da Produção (Operações Industriais e de Serviços)**. UnicenP. 2007.

ROONEY, J. J., HEUVEL, L. N. V. **Root Cause Analysis for Beginners**. QUALITY PROGRESS, p. 45-53. 2004.

SCHAEFFLER FAG. **Mounting of rolling bearings – Thermal mounting**. 2010.

SILVA, F. H. C. **A análise da causa raiz aplicada na redução do custo da qualidade**. Universidade Candido Mendes. 2016.

SKF, **Bearing damage and failure analysis**. 2017.

STAKE, L. **Análise computacional do impacto da estrutura tubular de um veículo baja SAE**. Universidade De Caxias Do Sul. 2020.

TEIXEIRA, T. C. A., CASSIANI, S. H. D. B. **Análise de causa raiz: avaliação de erros de medicação em um Hospital Universitário**. Rev Esc Enferm USP, p. 139-146. 2010.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **DOE Guideline - Root Cause Analysis Guidance Document**, Fevereiro 1992.

XU, X., LIU, Y. **Development of Transmission Technology for Energy-Saving Vehicles and New Energy Resource Vehicle**. J. Automot. Saf. Energy, 8(4), pp. 323–332. 2017.

XU, X., SUN, H., LIU, Y., DONG, P. **Automatic Enumeration of Feasible Configuration for the Dedicated Hybrid Transmission with Multi-Degree-of-Freedom and Multiplanetary Gear Set.** Journal of Mechanical Design, 141(9), 093301-1. (2019).

ZHANG, YI, MI, CHRIS. **Automotive power transmission systems.** John Wiley & Sons. (2018).