



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**



ALEX NORONHA DA SILVA

**SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO E
FABRICAÇÃO DO BRAÇO DE ALAVANCA PARA ÔNIBUS COM 15
TONELADAS DE PESO BRUTO TOTAL**

**VOLTA REDONDA
2025**



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



**SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO E
FABRICAÇÃO DO BRAÇO DE ALAVANCA PARA ÔNIBUS COM 15
TONELADAS DE PESO BRUTO TOTAL**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, na área de concentração de Processamento e caracterização de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos, linha de pesquisa de Materiais Metálicos.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Rosa Correa

**VOLTA REDONDA
2025**



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



ALEX NORONHA DA SILVA

SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO E
FABRICAÇÃO DO BRAÇO DE ALAVANCA PARA ÔNIBUS COM 15
TONELADAS DE PESO BRUTO TOTAL

Orientador: Prof. Dr. Sandro Rosa Corrêa

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
“MESTRE EM MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM MATERIAIS

Roberto de Oliveira Magnago
Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Sandro Rosa Corrêa

Prof. Dr. Sandro Rosa Corrêa
Presidente / UniFOA

Janaina da Costa Pereira Torres de Oliveira

Prof. Dr. Janaina da Costa Pereira Torres de Oliveira
Examinador interno / UniFOA

José Mauro Moraes Júnior

Prof. Dr. José Mauro Moraes Júnior
Examinador externo / UF

Junho de 2025

 REQUESTED	TITLE	FOLHA DE APROVAÇÃO ALEX NORONHA
	FILE NAME	115_123_2025711033526650_581920.pdf
	REQUEST ID	signature_request_8ab08b44-48eb-4e72-9da8-
	REQUESTED BY	ANGELICA MIRANDA DE OLIVEIRA
	STATUS	● Completed

Sandro Rosa Corrêa (sandro.correa@foa.org.br)

 SENDED	01/07/2025 15:26:39UTC±0	 SIGNED	01/07/2025 22:22:05UTC±0 173.245.211.158
---	-----------------------------	---	--

Janaina da Costa P. T. de Oliveira (janaina.oliveira@foa.org.br)

 SENDED	01/07/2025 22:22:05UTC±0	 SIGNED	02/07/2025 01:09:10UTC±0 177.97.6.107
---	-----------------------------	---	---

José Mauro Moraes Júnior (josemoraes@id.uff.br)

 SENDED	02/07/2025 01:09:10UTC±0	 SIGNED	02/07/2025 13:54:06UTC±0 200.159.241.9
---	-----------------------------	---	--

Roberto de Oliveira Magnago (roberto.magnago@foa.org.br)



SENDED

02/07/2025
13:54:07UTC±0



SIGNED

02/07/2025
14:51:40UTC±0
177.26.92.173



COMPLETED

02/07/2025
14:51:40 UTC±0
O documento foi concluído.



Para obter e validar o documento em versão digital, faça a leitura do código ao lado ou utilize o link abaixo:

<https://unifoa.portalassinatura.abans.com.br/sign/download/e9%2fQlYqMr0WGHeVS3S1Baf16p7%2blWqGwEsj98aLvp0%2fixnTOpkQq%2bUTDEJR8RAW7%2bd2dNaPy5ovzi4HMPPQXYhsHQc7%2fMWS%2bHbhmeysVfeceIFrq41%2baJkyFsyGF-SVG>

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tação Wagner - CRB 7/RJ 4316

S586s Silva, Alex Noronha da

Sistematização do processo de desenvolvimento e fabricação do braço de alavanca para ônibus com 15 toneladas de peso bruto total. / Alex Noronha da Silva. - Volta Redonda: UniFOA, 2025.

108 p.: II

Orientador (a): Prof. Sandro Rosa Corrêa

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2025

1. Materiais - dissertação. 2. Engate de marchas - certificação. 3. Transporte coletivo - ergonomia. 4. FEA. I. Corrêa, Sandro Rosa. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

AGRADECIMENTOS

A realização dessa Dissertação marca uma importante etapa da minha vida, onde pude usar minha experiência de 20 anos de indústria e elaborar um trabalho científico.

Gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram de forma decisiva para a sua realização, sendo assim, meus sinceros agradecimentos:

O Professor Doutor Sandro Rosa Corrêa, do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, principal responsável como orientador científico, desejo expressar o meu agradecimento pela total compreensão, disponibilidade, paciência e críticas construtivas pelos ensinamentos transmitidos na presente dissertação.

À minha esposa Lessandra Ferreira Lameira, pelo seu companheirismo, amor, compreensão que, por muitas vezes, deixamos de fazer viagens devido aos estudos, sempre me apoiando e torcendo para que tudo desse certo, assim como ao longo da nossa vida em comum nesses últimos 3 anos.

Aos meus pais, José Luiz da Silva e Maria Imaculada Noronha da Silva pelo seu apoio, ajudando-me nas decisões mais complicadas e dando-me sempre força ao longo da minha vida.

Ao meu filho Fabiano Sacilotti Noronha, que foi um incentivo para conseguir finalizar, que me deu forças mesmo com toda dificuldade de tempo necessário para dedicação a esse estudo.

Aos meus amigos de trabalho, Lucas Germano Gonzaga Dorador Servilheira, Gustavo Borges Amorim, Paula Letícia Corrêa de Toledo Cury, sempre me ajudando com informações do nosso projeto e auxílio nas caracterizações no laboratório, que se transformou em uma dissertação, e aos meus gestores Daniel de Oliveira, Caio Perez Lopes Coelho, Juliano de Assis Pereira e Rodrigo de Oliveira Chaves, que por muitas vezes tive que me ausentar do ambiente de trabalho para estudar.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus, o maior orientador da minha vida. Ele nunca me abandonou nos momentos de necessidade.

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos é apenas uma gota no oceano. Mas, o oceano seria menor se lhe faltasse uma gota.

Madre Teresa de Calcutá, 1968.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo Geral	19
2.2 Objetivos Específicos	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 SISTEMAS DE PROPULSÃO	20
3.1.1 Propulsão convencional	22
3.1.2 Sistemas de propulsão em ônibus: Transmissão, evolução e detalhamento do sistema	24
3.1.3 Formatos e Projetos de Transmissão	26
3.1.4 Formato de transmissão	26
3.1.5 Transmissão manual	35
3.1.6 Alavanca de mudanças de marchas	41
3.2 SOLDAGEM	42
3.2.1 Processo MIG/MAG	42
3.2.2 Metalurgia da soldagem	47
3.2.3 Descontinuidades	49
3.2.4 Porosidades	49
3.2.5 Trincas	51
3.2.6 Inclusão	53
3.3 MECÂNICA DA FRATURA	54
3.3.1 Fadiga em juntas soldadas	55
3.4. ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS – AEF	57
3.4.1 Tensão de Von Mises	58
3.5 ERGONOMIA	59
3.5.1 Norma SAE J826	59
4. METODOLOGIA	61
4.1 DEFINIÇÃO DO DESIGN	61
4.2 ANÁLISE ESTRUTURAL	65
4.2.1 Modelo CAD	65
4.2.2 Definição das cargas e condições de restrição	67

4.2.3 Definir o tipo de análise	70
4.2.4 Processamento da análise	70
4.2.5 Pós-processamento dos resultados	70
4.2.6 Redefinição do material	76
4.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO	79
4.3.1 Confeção do protótipo	79
4.4 CERTIFICAÇÃO	80
4.5 CARACTERIZAÇÃO DA ALAVANCA	81
4.5.1 Ensaio não destrutivos	81
4.5.2 Ensaio destrutivos	82
4.5.3 Ensaio de dureza Brinell	83
4.5.4 Análise Macroscópica	83
4.5.5 Análise Microscópica	84
4.5.6 Ensaio de Microdureza Vickers	85
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
5.1 Protótipo 1	86
5.1.1 Extensometria	87
5.2 Protótipo 2	89
5.3 Protótipo 3	92
5.3.1 Ensaio Mecânicos	93
5.3.2 Ensaio Metalográfico	95
5.3.3 Análise macroscópica da Falha	96
5.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	98
5.4 Protótipo 4	98
5.4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ALAVANCA FINAL – PROTÓTIPO 4	101
6. CONCLUSÃO	102
REFERÊNCIAS	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Projetos de tração para ônibus	25
Figura 2: Fatores de especificação para formato e design de transmissão	26
Figura 3: Exemplos de diferentes formatos de transmissão	27
Figura 4: Tração dianteira	28
Figura 5: Tração padrão	29
Figura 6: Acionamento do motor traseiro	30
Figura 7: Transmissões automotivas	31
Figura 8: Classificação da transmissão automotiva	32
Figura 9: Transmissão de 2 árvores	36
Figura 10: Transmissão de 3 árvores	36
Figura 11: Fluxo de Marcha ré	37
Figura 12: Fluxo de 1ª Marcha	37
Figura 13: Fluxo de 2ª Marcha	38
Figura 14: Fluxo de 3ª Marcha	38
Figura 15: Fluxo de 4ª Marcha	39
Figura 16: Fluxo de 5ª Marcha	39
Figura 17: Fluxo de 6ª Marcha	40
Figura 18: Alavanca de marchas do tipo comando direto	42
Figura 19: Esquema do processo de soldagem por MIG/MAG	43
Figura 20: transferência por curto-circuito	45
Figura 21: Modos de transferência de metal de solda MIG/MAG	46
Figura 22: Conceito de energia de soldagem. P é a potência dissipada no arco ($V.I$), ($n.V.I$) é a potência cedida à peça e l é o comprimento da solda	48
Figura 23: Ciclo térmico de soldagem (esquemático)	49
Figura 24: Esquema dos tipos de distribuição de porosidade: (a) distribuída, (b) agrupada, (c) alinhada	51
Figura 25: Exemplo de trinca formada entre uma chapa de aço e um pino de aço	52
Figura 26: Inclusão de escória	54
Figura 27: Cilindro elíptico que representa a região em que não ocorre falha plástica	59

Figura 28: Posição ergonômica baseada na SAE J826	60
Figura 29: Percentil da tipologia do perfil do motorista	62
Figura 30: Vista lateral – Design ergonômico do sistema de acionamento de marchas do veículo Huracán	63
Figura 31: Vista superior – Design ergonômico do sistema de acionamento de marchas do veículo Huracán	63
Figura 32: Vista lateral – Design ergonômico da alavanca do acionamento de marchas do veículo Huracán	64
Figura 33: Perfil do menor (rosa) e maior motorista (cinza)	64
Figura 34: Proposta design 1 com barra maciça	66
Figura 35: Proposta design 2 com tubo e barra maciça	67
Figura 36: Proposta design 3 com tubo e barra	67
Figura 37: Posições da alavanca de marchas – Engate e seleção	68
Figura 38: Célula de carga na alavanca para aquisição dos carregamentos dos engates de marcha	69
Figura 39: Gráfico das aquisições dos carregamentos na alavanca de engate .	69
Figura 40: Resultado FEA design 1 – Engate	71
Figura 41: Resultado FEA design 1 – Seleção	72
Figura 42: Resultado FEA design 2 – Engate	73
Figura 43: Resultado FEA design 2 – Seleção	73
Figura 44: Resultado FEA design 3 – Engate	74
Figura 45: Resultado FEA design 3 – Seleção	75
Figura 46: Resultado FEA design 1 - Aço SAE 1020 HR – Engate	76
Figura 47: Resultado do FEA - Aço SAE 1018 CD – Via de engate	77
Figura 48: Resultado do FEA - Aço SAE 1018 CD – Seleção	78
Figura 49: Design final com materiais aprovados no FEA	79
Figura 50: Desenho para confecção do primeiro protótipo da alavanca	80
Figura 51: Campo de provas da Volkswagen	81
Figura 52: Circuito de odagem	81
Figura 53: Produtos e equipamentos para ensaio de líquido penetrante	83
Figura 54: Durômetro Instron Wolpert	83
Figura 55: Estereoscópio Olympus SZ61	84
Figura 56: Microscópio Óptico Olympus BX61	84

Figura 57: Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss EVO 10 MA	85
Figura 58: Microdurômetro Shimadzu LG PS2-5	86
Figura 59: Extensômetros na alavanca de engate	87
Figura 60: Extensômetros no finger da transmissão	87
Figura 61: Massa da alavanca de engate de marchas protótipo	88
Figura 62: Gráfico das aquisições dos carregamentos no finger da transmissão	89
Figura 63: Alavanca com baixa massa	90
Figura 64: massa de 675 g	90
Figura 65: Gráfico das aquisições dos carregamentos no finger da transmis- são Extensômetro S5 – sentido da via de engate	91
Figura 66: Gráfico das aquisições dos carregamentos no finger da transmissão Extensômetro S6 – sentido da via de seleção.....	92
Figura 67: Proposta alavanca com menor massa	92
Figura 68: Esquema da região amostrada da alavanca de engate para caracterização	94
Figura 69: Microestrutura do metal base – Ataque nital 3%. Aumento 100X	95
Figura 70: Regiões da fratura	96
Figura 71: Região da solda com fratura	97
Figura 72: Fractografias da superfície de fratura obtidas no MEV	97
Figura 73: Micrografia da região da junta soldada	98
Figura 74: Peça final avaliada	99
Figura 75: Microestrutura do metal base da peça final – Ataque nital 3%. Aumento 100X	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tensões de escoamento	66
Tabela 2: Cargas aplicadas na alavanca	68
Tabela 3: Critério de aprovação de projeto (C.P) – Design 1	72
Tabela 4: Critério de aprovação de projeto (C.P) – Design 2	74
Tabela 5 – Critério de aprovação de projeto (C.P) – Design 3	75
Tabela 6: Critério de aprovação de projeto (C.P) Aço SAE 1020 HR-Design 1.	77
Tabela 7: Critério de aprovação (C.P) - Aço SAE 1018 CD – Design 1.....	78
Tabela 8: Resultado do ensaio de dureza	94
Tabela 9: Resultado do ensaio de microdureza	95
Tabela 10: Resultado do ensaio de dureza	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Comparação entre indústria e transmissão automotiva	33
Quadro 2: Classificação de trincas propostas pelas normas DIN 8524 e AWS B 1.0	52

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Força de tração	20
Equação 2 - Resistência aerodinâmica	21
Equação 3 - Resistência ao rolamento	22
Equação 4 - Critério de projeto (C.P)	58

LISTA DE ABREVIATURAS

ANSI - American National Standards Institute

ASME - American Society of Mechanical Engineers

AWS - American Welding Society

CD - Cold drawing

CAE - Computer Aided Engineering

DIN - Deutsches Institut für Normung

EN - Norma Européia

FE - Elementos Finitos

FEA - Finite Element Analysis

FEM - Finite Element Method

FEA - Finite Element Analysis

FT - Força de Tração

GMAW - Gas Metal Arc Welding

GTAW - Gas Metal Arc Welding

HR - Hot Rolled

MEF - Método de Elementos Finitos

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MFLE - Mecânica da Fratura Linear-elástica

MFEP - Mecânica da Fratura Elasto-plástica

PBT - Peso Bruto Total

SAE - Society of Automotive Engineers

TIG - Tungsten Inert Gas

VW - Volkswagen

ZTA - Zona Termicamente Afetada

RESUMO

Este trabalho apresenta uma investigação sobre a sistematização do processo de desenvolvimento e fabricação do braço de alavanca para ônibus com 15 toneladas de Peso Bruto Total (PBT). O estudo visa compreender e aprimorar as etapas envolvidas nesse processo, desde a concepção até a certificação do produto final, considerando aspectos cruciais como design, certificação, testes e análise de falhas. Os principais setores envolvidos no desenvolvimento do produto foram identificados e analisados, destacando suas interações e contribuições ao longo das fases de conceituação, design, certificação e testes. A relação entre essas etapas foi explorada minuciosamente, revelando a importância da integração fluida e eficiente para o sucesso do projeto. Avaliou-se como as falhas em uma fase específica impactam as metas globais do projeto, evidenciando a necessidade de abordagens mais robustas e preventivas para mitigar possíveis problemas ao longo do processo. A análise de elementos finitos (FEA) do componente proporcionou premissas valiosas sobre sua resistência e comportamento estrutural, permitindo a identificação de áreas de melhoria. Além disso, foram realizadas análises de falha detalhadas para compreender as causas subjacentes a possíveis problemas, oferecendo subsídios para a proposição de melhorias no design e material do braço de alavanca. A avaliação do impacto de alterações no design e material na eficiência global do produto revelou oportunidades significativas para otimização e aprimoramento do componente. Com base nos resultados obtidos, foram propostas melhorias no processo de desenvolvimento do braço de alavanca, visando aprimorar a eficiência, resistência e segurança do produto final. Por fim, foi realizada uma avaliação crítica da eficácia do processo de certificação, identificando pontos fortes e áreas passíveis de aprimoramento para garantir a conformidade e qualidade do braço de alavanca.

Palavras-chave: Engate de Marchas. Certificação. Ergonomia. FEA. Transporte Coletivo.

ABSTRACT

This work presents an investigation into the systematization of the development and manufacturing process of a lever arm for buses with a Gross Vehicle Weight (GVW) of 15 tons. The study aims to understand and improve the stages involved in this process, from initial design to final product certification, considering critical aspects such as design, certification, testing, and failure analysis. The main departments involved in product development were identified and analyzed, highlighting their interactions and contributions throughout the phases of concept development, design, certification, and testing. The interrelationship between these stages was thoroughly explored, revealing the importance of seamless and efficient integration for project success. The study evaluated how failures in specific stages impact the overall project goals, emphasizing the need for more robust and preventive approaches to mitigate potential issues throughout the process. Finite Element Analysis (FEA) of the component provided valuable insights into its strength and structural behavior, enabling the identification of areas for improvement. Furthermore, detailed failure analyses were conducted to understand the underlying causes of potential issues, supporting recommendations for improvements in the lever arm's design and material selection. The assessment of the impact of design and material changes on the product's overall efficiency revealed significant opportunities for optimization and enhancement. Based on the findings, improvements were proposed for the lever arm development process to enhance the efficiency, strength, and safety of the final product. Lastly, a critical evaluation of the certification process's effectiveness was carried out, identifying strengths and areas for improvement to ensure compliance and quality of the lever arm.

Keywords: Lever arm, Certification, Ergonomics, FEA, Bus.

1. INTRODUÇÃO

O transporte coletivo é extremamente importante, dada a sua influência direta na mobilidade urbana, economia e qualidade de vida da população, e devemos ter condições adequadas para que o condutor, no caso um ônibus com motor dianteiro, tenha um bom ambiente de trabalho, onde entra os conceitos de ergonomia que está aliada diretamente à saúde ocupacional, evitando afastamentos médicos por doenças de trabalho, stress, fadiga muscular (ANTP, 2016). – Acessibilidade nos sistemas de transporte público. Vol 4)

Esse estudo visa projetar um braço de alavanca, ou alavanca de marchas, que tem a função de trocar as marchas do veículo, nesse caso, ônibus. O México é um país conhecido por já possuir veículos da marca, porém caminhões, e conhecendo esse mercado, foi visto uma oportunidade de negócio com a fabricação de chassis de ônibus.

O México é um esse país caracterizado por cidades densamente povoadas e em constante expansão, sendo a terceira maior população das Américas, e os sistemas de transporte coletivo desempenham um papel vital na facilitação do deslocamento eficiente e acessível para milhões de mexicanos diariamente, isso inclui a acessibilidade, inclusão social, alívio do tráfego, economia, sustentabilidade, desenvolvimento urbano (Cortez, 2023).

Atualmente, o setor de transporte coletivo busca incessantemente soluções inovadoras e sustentáveis para suas operações. Nesse contexto, o sistema de propulsão de ônibus desempenha um papel crucial, representando a uma parcela significativa da eficiência operacional e do compromisso ambiental.

À medida que avanços tecnológicos transformam a indústria automotiva, o foco no desenvolvimento de sistemas de propulsão eficientes, econômicas e ecologicamente responsáveis torna-se mais transigente do que nunca. Assim, é necessário explorar a complexidade e a importância do sistema de propulsão em ônibus, examinando as diferentes tecnologias e abordagens adotadas para veículos que não movimentam apenas passageiros, mas também promovem a inovação e a sustentabilidade no cenário do transporte público.

Outro aspecto relevante é que a ergonomia para motoristas de ônibus desempenha um papel fundamental na promoção da saúde, segurança e desempenho eficiente no ambiente de trabalho. Decorrente da natureza desafiadora e muitas vezes prolongada das jornadas dos motoristas de ônibus, é imprescindível projetar o espaço de trabalho de maneira a minimizar o estresse físico e mental, conforto condições ergonômicas ideais.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma alavanca de engate de marchas do tipo comando direto na transmissão, utilizada em um ônibus com motor dianteiro, com aplicação em vias e rotas urbanas, com foco no mercado de exportação para o México.

2.2 Objetivos Específicos

Elaboração de um projeto de alavanca otimizado, alinhando requisitos mecânicos, ergonômicos e de custo, contribuindo para melhorias na transmissão veicular e na qualidade de trabalho do condutor, com as etapas a seguir:

- Elaborar o design da alavanca, utilizando as normas de ergonomia e simulação estrutural por elementos finitos;
- Confeccionar protótipo da alavanca;
- Testar o protótipo no veículo em condições reais da aplicação;
- Avaliar o componente testado atendendo os requisitos de certificação, realizando caracterizações metalúrgicas, ensaios destrutivos e não destrutivos;
- Homologar produto, atendendo os requisitos de certificação da empresa, com desenhos detalhados inseridos no sistema e relatórios de testes;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SISTEMAS DE PROPULSÃO

Os sistemas de propulsão, motor e transmissão principalmente, desempenham um papel crucial no desenvolvimento de veículos avançados, como automóveis, aviões e embarcações, e o braço de alavanca é uma das interfaces do condutor com os componentes mencionados. Nos últimos anos, houve uma série de avanços significativos nessa área, impulsionados pela demanda por soluções de propulsão mais eficientes, sustentáveis e inovadoras.

Para que um veículo seja capaz de se deslocar autonomamente, é essencial possuir um conjunto específico de componentes, como, por exemplo, um sistema de propulsão. O sistema de propulsão tem a responsabilidade de fornecer a energia necessária para superar as forças que se opõem ao movimento, tais como o arrasto aerodinâmico, o atrito dos pneus com a superfície da estrada, o peso do veículo e a sua própria inércia (Rajkumar *et al*, 2020).

A determinação da força de tração (F_T) necessária do sistema de propulsão para movimentar um veículo, é realizada por meio do cálculo de acordo com a equação (1), derivada da segunda Lei de Newton, dessa forma, tem-se:

$$F_T = D + R + m \frac{dV}{dt} + m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

Portanto, podemos observar que a força de tração (F_T) é o resultado do produto da massa do veículo (m) pela aceleração (a) e força de resistência ao rolamento (F_{rr}) com a soma do arrasto aerodinâmico (F_d) com a componente da força gravitacional em rampas (F_g) (Heywood, 2018).

De acordo com a equação (2), é possível notar que essa resistência é influenciada pela densidade do meio circundante (ρ), pelo quadrado da velocidade de deslocamento (V), pelo coeficiente de arrasto (C_D) e pela área frontal do veículo (A) (Gomes, 2010).

O coeficiente de arrasto (CD), por sua vez, é dependente da configuração da carroceria do veículo e da interação que essa carroceria tem com o meio ao seu redor. No que se refere ao design da carroceria, além das considerações aerodinâmicas, é importante notar que quanto mais perturbação um veículo causa no ar durante o deslocamento, maior será a resistência ao movimento que será gerada.

$$D = \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot c_D \cdot A \quad (2)$$

Dessa forma, a avaliação do desempenho aerodinâmico de um determinado veículo é realizada por meio de testes em túneis de vento, nos quais a direção das correntes de ar é analisada visualmente com a ajuda de emissões de fumaça. Através desses testes, tem sido possível aprimorar o design da carroceria, eliminando ângulos e arestas agudas, que são substituídos por formas e curvas suavizadas (Faias, 2006).

No que diz respeito à resistência aerodinâmica total, é importante considerar a influência do vento, que será maior à medida que o volume do veículo aumenta. No entanto, determinar essa influência em situações reais não é uma tarefa fácil, uma vez que o vento possui um caráter aleatório e variável. No entanto, o vento é responsável por alterações na resistência ao movimento e pode modificar as trajetórias do veículo (Gomes, 2010).

A resistência ao rolamento, representada por R, surge devido ao atrito entre os pneus e a superfície da estrada, sendo desejável que essa resistência seja elevada para garantir a segurança durante a condução. No entanto, essa condição resulta em altos consumos de combustível, o que pode levar a um compromisso entre o consumo e a segurança. Portanto, a resistência ao rolamento R pode ser determinada de acordo com a equação (3), na qual f_R representa o coeficiente de atrito ao rolamento e $m \cdot g \cdot \cos \alpha$ corresponde à componente vertical do peso do veículo (Faias, 2006).

$$R = f_R \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

O coeficiente de atrito f_R é influenciado por diversos fatores, como o material de construção da estrada, as condições climáticas, a pressão dos pneus, a composição e a temperatura da superfície de deslocamento, entre outros. A complexidade desses fatores torna a determinação do coeficiente uma tarefa desafiadora, sendo frequentemente obtido experimentalmente de duas maneiras: 1) através do rolamento em uma estrada real ou 2) por meio de uma instalação composta por um tambor onde o pneu circula (Faias, 2006).

Assim, quando um veículo se desloca a uma velocidade constante em um plano horizontal, a força de tração necessária apenas precisa superar a resistência aerodinâmica e a resistência ao rolamento. Para velocidades mais baixas, a resistência ao rolamento é predominante, enquanto em velocidades mais altas é a resistência aerodinâmica que se torna mais significativa (Wong, 2008).

Os sistemas de propulsão em veículos estão passando por avanços significativos para atender às demandas de eficiência e sustentabilidade. A eletrificação, os sistemas híbridos e novas formas de propulsão estão entre as áreas de pesquisa mais ativas. À medida que a pesquisa continua evoluindo, espera-se que essas inovações impulsionem a indústria automotiva em direção a um futuro mais limpo e eficiente (Heywood, 2018)

3.1.1 Propulsão convencional

Um sistema de propulsão convencional é amplamente descrito na literatura como o tipo mais comumente associado aos veículos automóveis. Nesse tipo de sistema, um motor térmico é utilizado para impulsionar o veículo.

Em termos de funcionamento e principais componentes, o sistema de propulsão convencional consiste principalmente em um motor de combustão interna de movimento alternativo, no qual a energia química armazenada em um

determinado combustível é convertida em energia mecânica. Essa energia é então transmitida a uma caixa de câmbio por meio da embreagem e, finalmente, é transmitida às rodas após passar pelo sistema de transmissão (Aláez *et al.*, 2010).

Dessa forma, os diversos componentes que constituem o sistema de propulsão convencional incluem: tanque de combustível, motor de combustão interna, embreagem, caixa de câmbio e transmissão.

O tanque de combustível tem a função de armazenar o combustível que é utilizado pelo motor de combustão interna. Portanto, a autonomia desse tipo de sistema está diretamente relacionada ao volume do tanque. Volumes maiores permitem o transporte de maiores quantidades de combustível. No entanto, é importante mencionar que o aumento da quantidade de combustível transportada resulta em um aumento da massa do veículo e, conseqüentemente, um maior consumo de energia (Aláez *et al.*, 2010).

Quanto ao funcionamento do motor de combustão interna, ele se baseia na transformação do calor liberado durante a combustão de um determinado combustível em trabalho, por meio de um conjunto de pistões e cilindros (Costa, 2009). Esse motor fornece potência na forma de velocidade angular e torque, que é usado para impulsionar o veículo. A potência dos motores de combustão interna pode variar de 10W a 20MW, dependendo da finalidade de aplicação (Costa, 2009).

Outro componente do sistema de propulsão convencional é a caixa de câmbio, que tem a responsabilidade de aumentar as opções de funcionamento do veículo. Como o motor apresenta intervalos de torque e velocidades de rotação limitados, a flexibilidade de funcionamento do veículo é ampliada por meio da redução desses intervalos. Isso é alcançado pela utilização da caixa de câmbio, que combina diferentes tipos de engrenagens (Aláez *et al.*, 2010).

Quanto à transmissão, sua função é garantir a conexão mecânica entre a caixa de câmbio e as rodas. A transmissão é composta por um conjunto de engrenagens, eixos de transmissão para as rodas e um eixo de transmissão da caixa de câmbio.

Vale ressaltar que, quando o motor está instalado no eixo longitudinal do veículo, a transmissão também desempenha a função de modificar o movimento em 90 graus para o eixo transversal. No entanto, o conjunto de engrenagens também pode ser utilizado para afetar a relação de transmissão geral, como um complemento à caixa de câmbio (Faias, 2006).

De modo geral, o sistema de propulsão convencional utiliza uma tecnologia sólida e comprovada, o que influencia a escolha durante a aquisição de um veículo. Nesse sentido, a produção em grande escala tornou os veículos equipados com esse tipo de sistema mais acessíveis em termos de preço, além de oferecer uma ampla disponibilidade de marcas e modelos. Algumas das vantagens dos sistemas de propulsão convencionais incluem uma autonomia elevada, superior a 250 km, e a existência de postos de abastecimento de combustível praticamente em todo o mundo (Faias, 2006).

3.1.2 Sistemas de propulsão em ônibus: Transmissão, evolução e detalhamento do sistema

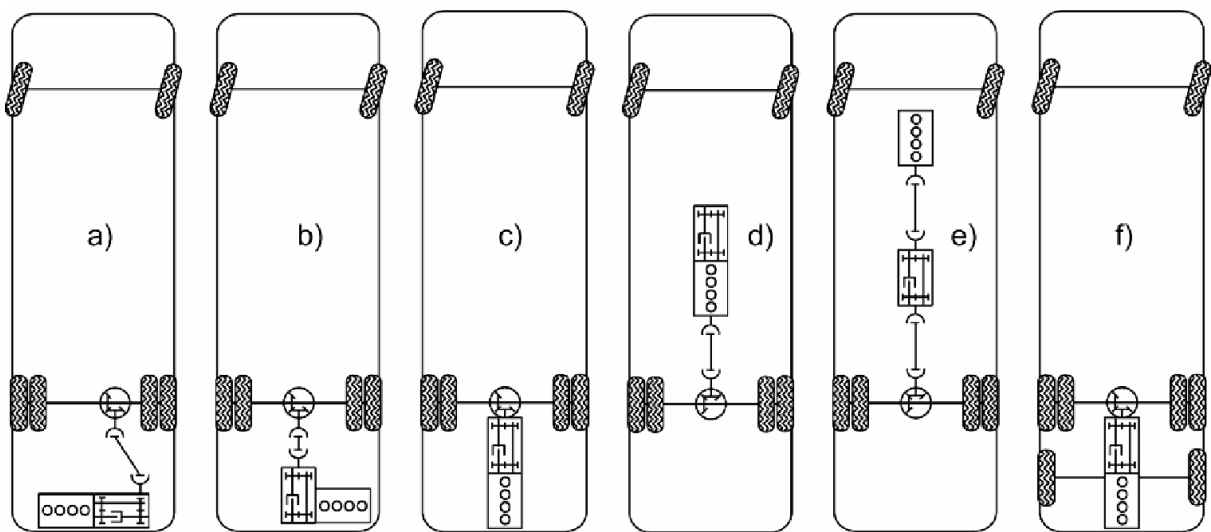
As decisões importantes na fase de conceito de um novo veículo são o tipo de veículo (passageiro, coupê, carro esportivo, comerciais, ônibus etc.) e o tipo de tração (tração dianteira, traseira, integral, parcial etc.). O tipo de condução tem um efeito significativo na condução, conforto de condução, economia, segurança e espaço disponível. Existem inúmeros fatores que influenciam o design da transmissão, tanto com tração nas rodas dianteiras, traseiras quanto com tração nas quatro rodas (Cardoso, 2012). Existem também muitas alternativas conhecidas para a posição relativa do motor, transmissão e transmissão final entre si.

Vamos tratar especificamente das configurações básicas dos ônibus, que são apresentadas a seguir, com base na classificação por transmissão e tipo de uso apresentado.

De acordo com Cardoso (2012), o ônibus muitas vezes tem motor traseiro, dianteiro ou central. Isso permite maior liberdade para projetar a acomodação de passageiros. A Figura 1 mostra exemplos de configurações de tração. Os veículos

para uso *off-road* e em canteiros de obras são quase sempre equipados com tração nas quatro rodas. O motor está localizado na frente ou no meio do veículo e os eixos de tração são de direção eixos motrizes à frente e eixos motrizes rígidos simples ou duplos atrás. O acionamento é entregue através de uma caixa de transferência (Cardoso, 2012).

Figura 1: Projetos de tração para ônibus.



Fonte: Naunheimer *et al.* (2011).

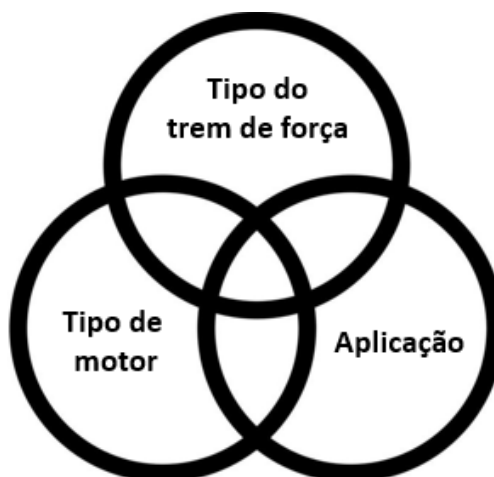
- a) motor transversal atrás do eixo, caixa de marchas transversal;
- b) motor transversal atrás do eixo, caixa de marchas longitudinal;
- c) motor longitudinal atrás do eixo, caixa de marchas longitudinal;
- d) motor longitudinal à frente do eixo, caixa de marchas montada em flange longitudinalmente ao motor;
- e) motor longitudinal à frente do eixo, caixa de marchas longitudinal;
- f) motor longitudinal e caixa de marchas longitudinal, eixo de arrasto.

3.1.3 Formatos e Projetos de Transmissão

As transmissões completas são diferenciadas em termos de formato e design. A Figura 2 apresenta os fatores de especificação para o formato e design de transmissão, e refere-se à morfologia ou aparência externa da transmissão, ou à configuração de entrada e saída.

O projeto da transmissão descreve como as principais funções da transmissão são desenvolvidas e estão relacionadas à configuração interna. As transmissões podem ter designs diferentes e compartilhar o mesmo formato. O tipo de formato para um design depende de vários critérios; principalmente o design do veículo, o tipo de motor com tração e a aplicação.

Figura 2: Fatores de especificação para formato e design de transmissão.



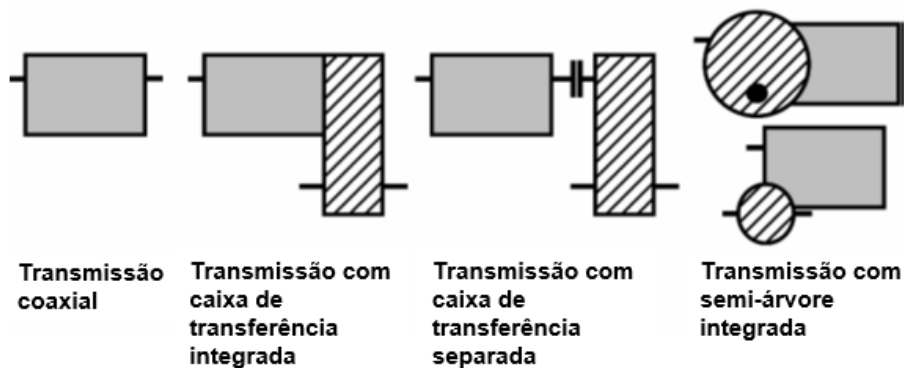
Fonte: Naunheimer *et al.* (2011).

3.1.4 Formato de transmissão

O formato da transmissão (Figura 3) é determinado principalmente pela posição da transmissão no veículo ou no trem de força (e quaisquer restrições

geométricas adicionais, como limitações de espaço. O formato também é afetado por considerações de montagem (tanto no que diz respeito à transmissão em si quanto no que diz respeito à sua instalação no veículo), pela rigidez da caixa da caixa de velocidades e pelas emissões de ruído. As transmissões geralmente compreendem vários redutores individuais, que também podem ser alojados em caixas de redutores separadas. Neste caso, a posição relativa das caixas individuais é um fator importante que influencia o formato da transmissão como um todo.

Figura 3: Exemplos de diferentes formatos de transmissão.



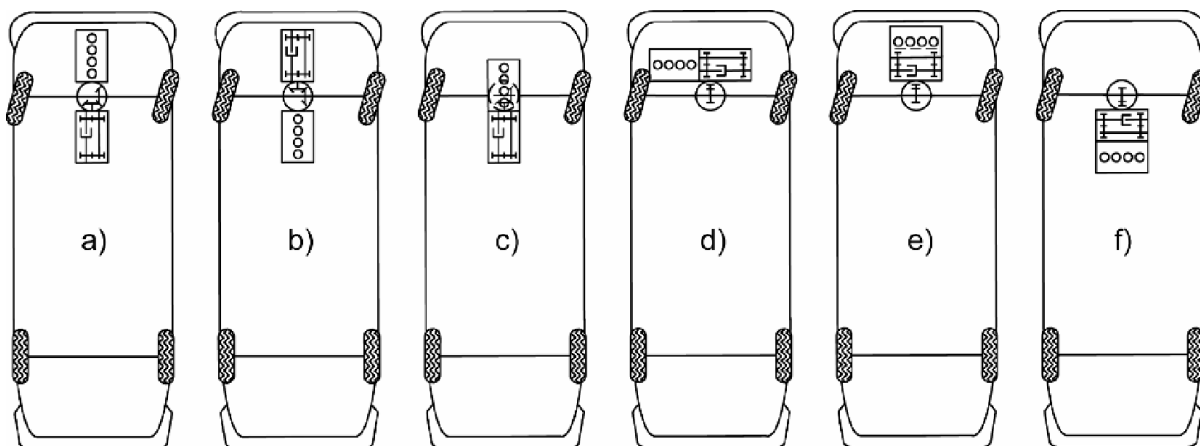
Fonte: Naunheimer *et al.* (2011).

Dessa forma, pode-se dizer quanto as trações que:

Tração dianteira, Figura 4:

- Motor longitudinal na frente do eixo, transmissão longitudinal (Figura 4a);
- motor longitudinal atrás do eixo, caixa de marchas longitudinal (Figura 4b);
- motor longitudinal acima do eixo, caixa de marchas longitudinal (Figura 4c);
- Motor transversal ao lado da transmissão (Figura 4d);
- motor transversal acima a caixa de marchas (Figura 4e);
- motor transversal atrás da caixa de marchas (Figura 4f).

Figura 4: Tração dianteira.

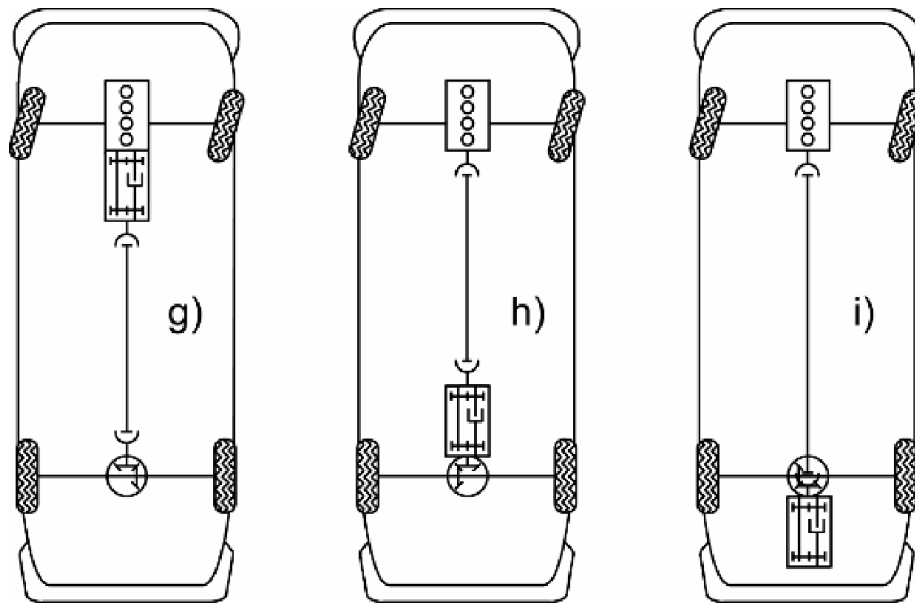


Fonte: Naunheimer *et al.* (2011).

Tração padrão, Figura 5:

Neste tipo de tração, o motor é acoplado na transmissão e, por meio da árvore de transmissão, ou eixo cardan, temos a transmissão de torque para o eixo traseiro, e através do diferencial, esse torque chega as rodas do veículo. O motor longitudinal pode ser na frente acima/atrás do eixo dianteiro, transmissão acoplada ao motor longitudinalmente, tração com diferencial no eixo traseiro (Figura 5g).

Figura 5: Tração padrão.



Fonte: Naunheimer *et al.* (2011).

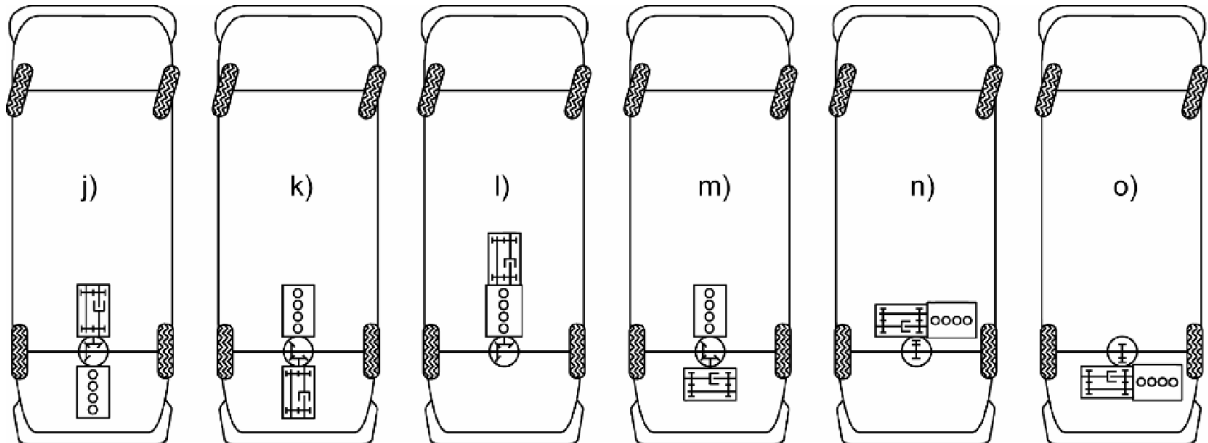
- g) Tração padrão”, motor longitudinal montado na frente acima/atrás do eixo dianteiro, caixa de marchas montada longitudinalmente ao motor, transmissão final com diferencial no eixo traseiro;
- h) motor longitudinal montado à frente/atrás do eixo dianteiro, caixa de marchas montada longitudinalmente à frente ou;
- i) atrás do eixo traseiro com transmissão final e diferencial integrados (princípio da transmissão).

Tração com motor traseiro, Figura 6:

- Para acionamento do motor traseiro, dependendo da posição do motor em relação ao eixo, uma distinção a mais é feita entre o design do motor traseiro e o motor central, utilizando o transaxle. Um transaxle é um componente automotivo que combina as funções de uma transmissão e um diferencial em um único conjunto. (Figura 5.h e 5.i).
- Motor longitudinal atrás do eixo (“motor traseiro”) (Figura 6j);

- Motor longitudinal na frente do eixo (Figura 6k).

Figura 6: Acionamento do motor traseiro.



Fonte: Naunheimer *et al.* (2011).

- j) motor longitudinal atrás do eixo (“motor traseiro”);
- k) motor longitudinal na frente do eixo;
- l) caixa de marchas e motor à frente do eixo;
- m) motor longitudinal à frente do eixo, caixa de marchas transversal atrás do eixo (configuração T);
- n) motor transversal ao lado da caixa de marchas na frente do eixo;
- o) motor transversal ao lado da caixa de marchas atrás do eixo.

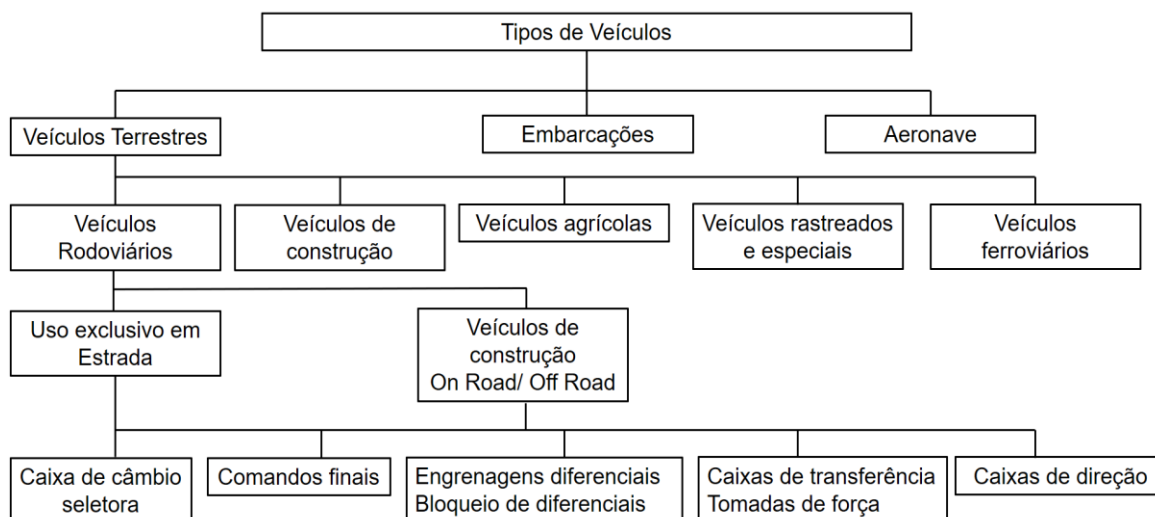
O termo transaxle é um termo geral para transmissão mais eixo. Isso significa que a transmissão e a tração do eixo são projetadas como uma unidade combinada. O conceito aplica-se, portanto, à tração dianteira, bem como às transmissões com a tração final montada no eixo traseiro. O termo usado na Alemanha é mais circunscrito e refere-se apenas à configuração do motor longitudinal dianteiro e da transmissão traseira com comando final (Figura 5.h e Figura 5.i). Essa incongruência de termos entre alemão e inglês muitas vezes leva a mal-entendidos (Naunheimer *et al.*, 2011).

Todos os veículos, aeronaves e embarcações incluídas, requerem transmissões para converter torque e velocidade do motor.

As transmissões são diferenciadas de acordo com sua função e propósito – por exemplo, caixas de velocidades seletoras, caixas de direção e tomadas de força. Este estudo trata exclusivamente de transmissões para veículos rodoviários bem como para veículos concebidos para utilização em estrada e fora de estrada (Figura 7).

A Figura 8 fornece uma visão geral dos projetos de transmissão comuns e sua sistemática classificação. Transmissões de dupla embreagem são atribuídas a transmissões automáticas com várias relações de transmissão devido à sua semelhança no que diz respeito ao controle e funcionalidade.

Figura 7: Transmissões automotivas.



Fonte: Nangunheime (2011).

Figura 8: Classificação da transmissão automotiva.

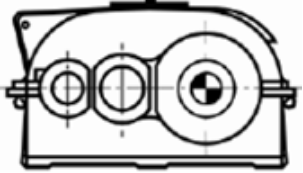
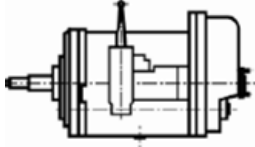
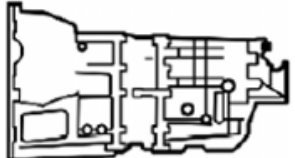
Classificação da Transmissão												
Transmissão de velocidade z Transmissões com engrenagens com velocidades z)								Transmissões continuamente variáveis (CVT)				
Transmissões manuais (MT)		Transmissões automatizadas		Transmissões automáticas com diversas relações			Acionamento híbrido com máquinas elétricas		Mecânico		Hidráulico	
Transmissão de malha constante	Transmissão sincronizada	Transmissão de malha constante semi-automática ou sincronizada	Transmissão de malha constante semi-automática ou sincronizada totalmente automatizada	Transmissão de dupla embreagem (DCT)	Transmissão automática tipo contraeixo	Transmissão automática convencional	Híbrido Serial	Híbrido Paralelo	Híbrido com divisão de potência	Transmissão de polia	Transmissão toroidal	Transmissão hidroestática
Com interrupção de torque				Sem interrupção de torque								
Partida com embreagem acionada por pedal						Partida automática						
Mudança de marcha manual				Mudança de marcha automática				Conversão automática de torque e velocidade				

Fonte: Nauenheimer *et al.* (2011).

A tarefa de uma transmissão é converter o torque disponível da unidade de acionamento, motor no caso, satisfazer os requisitos que lhe são impostos pelo veículo, pela estrada, pelo condutor e pelo meio ambiente. A competitividade técnica e econômica é essencial aqui, além do desempenho de condução e transporte de passageiros e veículos comerciais, as transmissões são de importância central no que diz respeito à confiabilidade, consumo de combustível, facilidade de operação e segurança rodoviária.

As transmissões automotivas são produtos produzidos em massa de alto nível técnico e ordem tecnológica. Eles são classificados como tecnologias altamente desenvolvidas. O que chama a atenção é a potência específica Peso em kW/kg da transmissão do veículo comercial que é mais de três vezes do que a transmissão industrial (Quadro 1), apesar de as transmissões automotivas terem mais velocidades. Por outro lado, as transmissões industriais devem ser projetadas para uma vida útil mais longa.

Quadro 1: Comparação entre indústria e transmissão automotiva.

Transmissão	Número de marchas	Relação 1ª marcha / overall	Potência (Kw)	Torque entrada (Nm)	Massa (Kg)	Potência específica (Kw/Kg)
Industrial 	1	12,5 -	330	2100	680	0,48 100%
Veículo comercial (AMT) 	16	14,1 17,0	397	2600	266	1,49 300%
Automóvel 	6	4,2 5,1	294	500	46	6,39 1300%

Fonte: Naunheimer *et al.* (2011).

As inovações básicas no campo das transmissões automotivas não devem mais ser esperado. Em vez disso, estamos testemunhando um processo de evolução gradual. Este processo caracteriza-se pelo pensamento sistêmico focado nos fatores meio ambiente, tráfego, tipo do veículo, motor/transmissão e pelo uso de eletrônica para operação, processos de controle e monitoramento.

O desenvolvimento da transmissão de veículos deve ser rápido e orientado para o mercado. Clientes, preferências, especialmente no caso de veículos comerciais, devem ser acomodadas com flexibilidade. Condições legais,

regulamentação kW/t ou políticas de emissão, por exemplo, deve ser encontrado. Além disso, aspectos emocionais como o prazer de dirigir devem também ser levado em consideração.

O principal objetivo ao projetar uma transmissão automotiva é uma conversão ideal do torque disponível do motor na força de tração do veículo em uma ampla faixa de velocidades de estrada. Isso deve ser feito de modo que haja um compromisso entre o número de velocidades, a subida e a aceleração desempenho e consumo de combustível. Mais desenvolvimentos técnicos e tecnológicos obviamente devem ser considerados – confiabilidade e vida útil também. Isso é também é essencial ter em conta as considerações ambientais e sociais.

O projeto das transmissões dos veículos deve estar sempre dentro do horizonte de planejamento para veículos novos. Durante a fase de desenvolvimento de um veículo, uma transmissão correspondente também deve ser criada ou desenvolvida. Para esse fim, novas tecnologias de fabricação para produção em massa também devem ser preparadas e introduzido.

Após o término da fase de produção, deve-se garantir que as peças de reposição sejam acessíveis. Para este efeito, os ciclos de vida de componentes adicionais, incluindo componentes semicondutores, devem ser levados em consideração.

3.1.5 Transmissão manual

Em uma transmissão tipo manual, a troca de marchas ocorre quando a embreagem é acionada e há interrupção de torque do motor para a transmissão, e, devido a isso, a transmissão ficou sem cargas, realizando a mudança de marchas. Nesse instante, o veículo fica em neutro, e sob a influência do momento de inércia, podendo implicar a perda de velocidade dependendo da dificuldade do terreno (Cardoso, 2012).

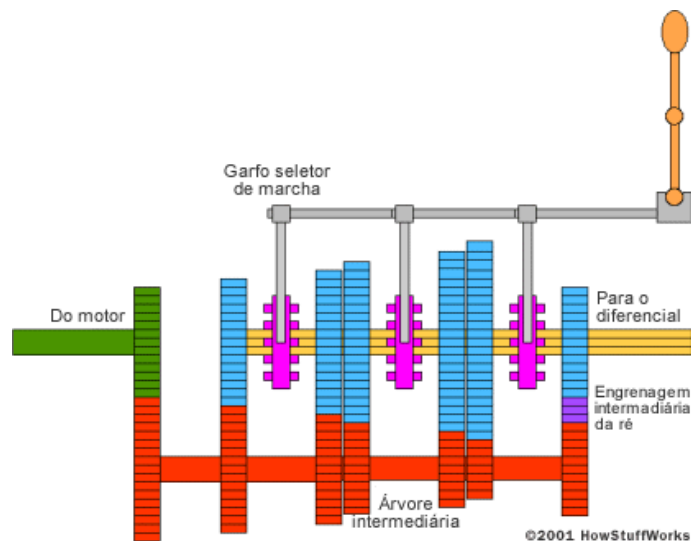
Para que não tenhamos essa perda de velocidade, a mudança de marchas deve ocorrer mais rápido possível, sendo possível realizar essa troca em frações de segundo dependendo do conceito da transmissão. Em transmissões manuais do tipo multi-range, com várias relações utilizadas em veículos utilitários comerciais, para que ocorra a mudança de marchas, esse tempo deve ser no máximo 0,3 segundos, para que isso ocorra, Essas transmissões, na maioria dos casos, possuem auxílio pneumático (Cardoso, 2012).

As transmissões manuais podem ser aplicadas em várias operações, como regra, que a velocidade do veículo não decresça, ou aumente no caso de descidas durante a troca de marchas (Cardoso, 2012). Se as forças de aceleração são baixas, a massa do veículo é alta, esse modelo de transmissão pode ser aplicado.

As transmissões manuais aplicadas em veículos de passeio, são de árvores opostas em sua maioria, ou eixos com engrenagens, e neste tipo de transmissão, as relações de marcha entre as árvores principais e secundária, são estabelecidas através de pares de engrenagens contrapostas ligadas ao fluxo de torque de forma manual (Cardoso, 2012). Essas transmissões possuem 2 ou 3 árvores em suas formas construtivas normalmente.

As transmissões manuais com 2 árvores, geralmente são utilizadas em automóveis de passeio, porém em veículos utilitários já são utilizadas as de 3 árvores, sendo possível mais combinações de engrenagens, e conseqüente mais relações de marcha, suportando torques elevados entregue pelo motor e entregando as rodas do veículo (Cardoso, 2012). A Figura 9 mostra o diagrama de uma transmissão de 2 árvores.

Figura 9: Transmissão de 2 árvores.

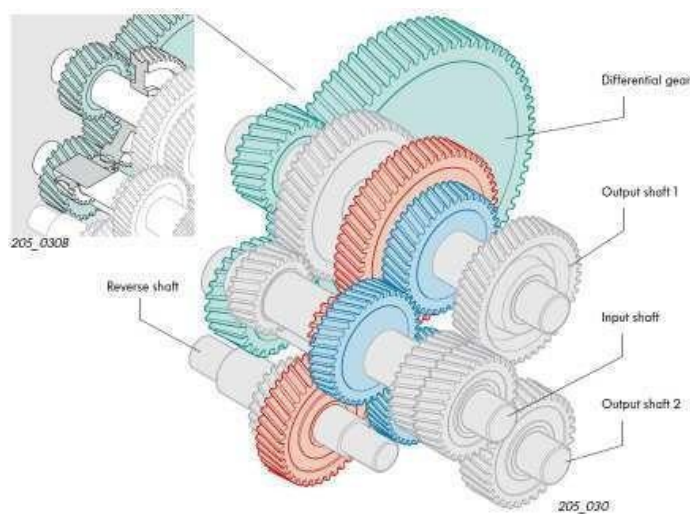


Fonte: VW Service Self-Study Program (1998).

O diagrama anterior mostra uma transmissão com cinco marchas para frente e uma para trás.

Na Figura 10, temos o diagrama de fluxo de torque em uma transmissão manual de 3 árvores, mostrados individualmente para cada conjunto de engrenagens em suas respectivas marchas.

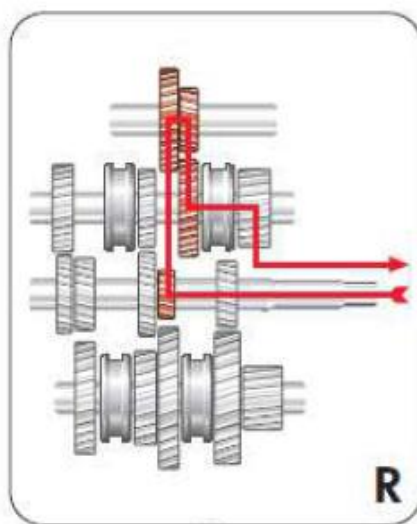
Figura 10: Transmissão de 3 árvores.



Fonte: VW Service Self-Study Program (1998).

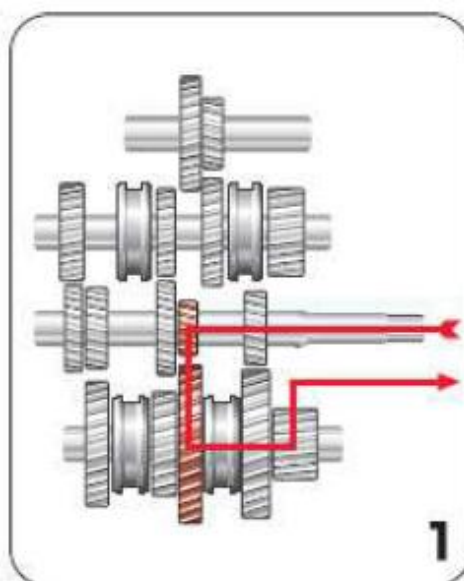
Os diagramas e fluxos de força em cada marcha são mostradas individualmente nas Figuras de 11 a 17:

Figura 11: Fluxo de Marcha ré.



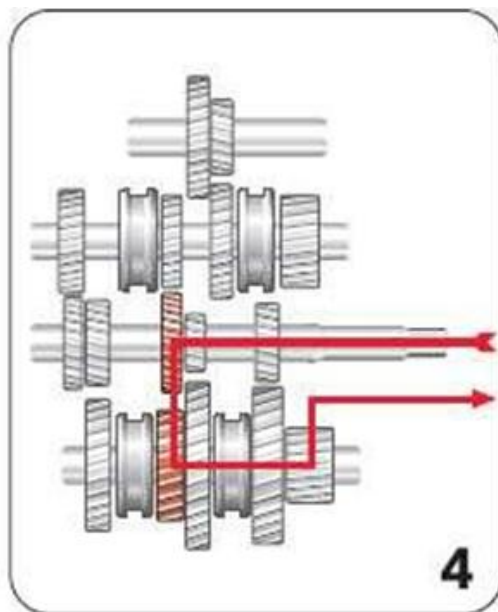
Fonte: VW Service Self-Study Program (1998).

Figura 12: Fluxo de 1ª Marcha.



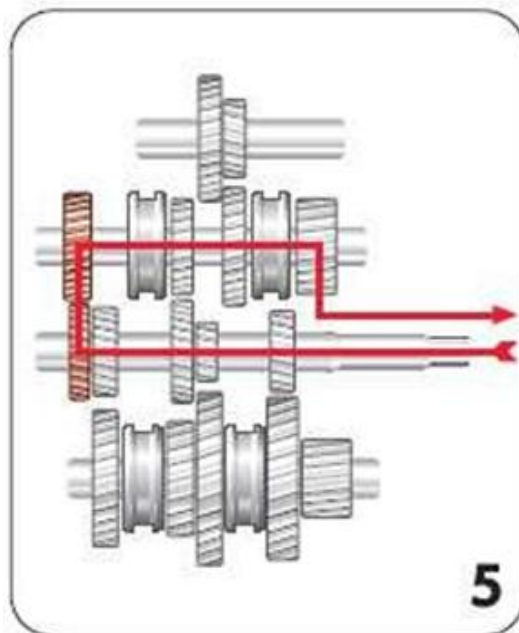
Fonte: VW Service Self-Study Program (1998).

Figura 15: Fluxo de 4ª Marcha.



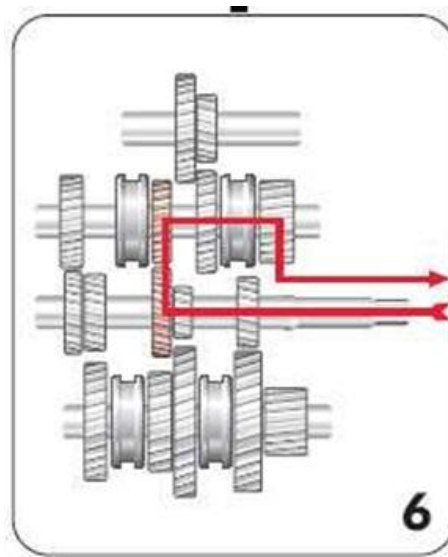
Fonte: VW Service Self-Study Program (1998).

Figura 16: Fluxo de 5ª Marcha.



Fonte: VW Service Self-Study Program (1998).

Figura 17: Fluxo de 6ª Marcha.



Fonte: VW Service Self-Study Program (1998).

As transmissões manuais com 2 árvores apresentam as seguintes vantagens:

- Menor massa (apenas 1 árvore secundária);
- Menor custo de fabricação;
- Melhor acústica;
- Melhor escalonamento de marchas.

E a principal desvantagem, a geometria maior, pois todas as marchas estão montadas em um só eixo (Cardoso, 2012).

As transmissões com 3 árvores apresentam a seguinte vantagem: arquitetura compacta; melhor distribuição de massa.

E as principais desvantagens são: maior custo de fabricação; maior massa; pior acústica; proximidade dos sincronizadores sobre a linha secundária; escalonamento mais difícil (Cardoso, 2012).

3.1.6 Alavanca de mudanças de marchas

Entende-se como o dispositivo mecânico que permite ao condutor engatar as marchas atingindo velocidades de modo a obter a relação de transmissão desejada são chamados de mecanismos de mudança ou Alavanca de Marchas. Esses dispositivos podem ser:

- Internos: se estiverem contidos na carcaça da caixa de marchas;
- Externos: quando são montados parcialmente na parte externa da caixa de marchas ou parcialmente na carroceria do veículo.

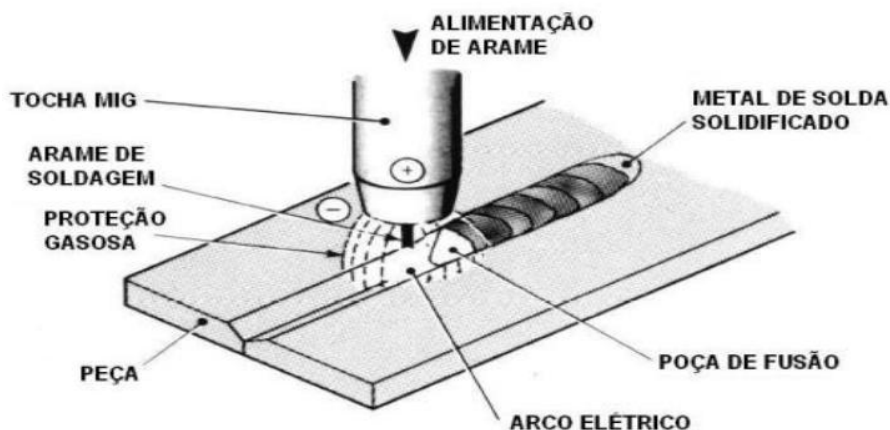
Ambos os tipos de Alavanca de Marchas, fazem a conexão da alavanca de câmbio com os mecanismos de mudança interna da caixa de marchas.

Os mecanismos internos da transmissão, ou garfo de mudança, desempenham uma função de importação, pois são responsáveis pela resposta que o motorista exerce na alavanca de marchas, colocando a marcha desejada pelo condutor naquele momento, e, portanto, deve ser ideal e preciso.

Do ponto de vista ergonômico, o atrito e folga entre peças móveis dos mecanismos de mudança devem ser projetados a fim de proporcionar ao condutor uma condução compatível com as velocidades e acelerações do veículo naquele momento.

A alavanca do nosso estudo é do tipo interna e com comando direto conforme mostra a Figura 18.

Figura 19: Esquema do processo de soldagem por MIG/MAG.



Fonte: ESAB (2005).

Tipos de gases mais utilizados no processo de soldagem MIG/MAG na indústria automotiva

No processo de soldagem MIG/MAG, o gás de proteção não tem influência somente nas propriedades da solda, ele também, determina o formato do cordão de solda, pois interage com cada tipo de arame utilizado. Para determinar qual melhor gás para atender aquele formato de solda desejado pela indústria automotiva, é fundamental um alinhamento entre todas as áreas envolvidas no processo de fabricação naquela etapa do veículo.

O tipo de gás a ser aplicado na solda, é determinado de acordo com a aplicação, sendo definido através de ensaios específicos, atendendo os requisitos metalúrgicos determinados por normas de cada fabricante. Essa determinação não envolve somente a aparência da solda, para que tenha a solda desejada, envolve também estudo de custos, pois os gases têm preços diferentes, dependendo da sua composição ou tipo. Para os processos MIG e MAG, diferenciam-se:

Processo MIG: é utilizado gás inerte, GMAW, Argônio e Hélio ou a mistura entre ambos em porcentagens pré-determinadas. Este gás é aplicado geralmente com arames de baixa liga e não ferrosos, como Bronze + Silício, Inconel e Alumínio, pode ser utilizado também na soldagem de chapas galvanizadas.

Processo MAG: é utilizado gás ativo, GMAW, Dióxido de Carbono e Oxigênio, ou a mistura destes com gases inertes como: Argônio e Hélio. Nesse processo de solda, MAG, as propriedades metalúrgicas da solda não são alteradas com o tipo de gás.

Para que a mistura se torne ativa, basta adicionar qualquer quantidade de CO_2 ou O_2 a um dos gases inertes, ocorrendo alteração nas propriedades metalúrgicas da solda e no comportamento do arco devido interferência do gás.

Para o processo de soldagem MIG/MAG, tem-se tipos de gases mais recomendados, podendo ter soldas realizadas com CO_2 puro ou mistura de dois ou mais gases, como: Ar + 25% de CO_2 , Ar + 8% de CO_2 , Ar + 4% de O_2 e Ar + He + CO_2 . Para cada mistura de gás na solda, atende-se uma finalidade específica, como redução de respingos, aumento da penetração e velocidade de soldagem, entre outros.

Estas misturas também são utilizadas na soldagem de chapas de Aço Carbono, Aço Inoxidável e Chapas Galvanizadas. Para o Aço Inoxidável, a mistura deve ter a porcentagem bem definida, para que não ocorra corrosão na solda ou na chapa soldada. Esses são alguns exemplos no qual pode ocorrer se o profissional não utilizar o gás para solda corretamente.

Na indústria automotiva, temos chapas com espessuras menores do que 5mm, em aço carbono, assim os gases mais utilizados são misturas de Argônio com CO_2 em diferentes percentuais, sendo mais utilizados: Ar + 20 a 25% CO_2 , Ar + 5 a 15% CO_2 , Ar + 2% O_2 e 8% CO_2 (Sumig, 2024).

O processo MAG não é recomendado para metais não ferrosos, como alumínio, cobre ou magnésio, pois os gases ativos, como CO_2 , ou misturas com argônio, podem reagir com esses metais e prejudicar a qualidade da solda, sendo assim, esse processo é ideal para a soldagem de metais ferrosos, como: aço carbono, aço de baixa liga (ABNT NBR ISO 4063).

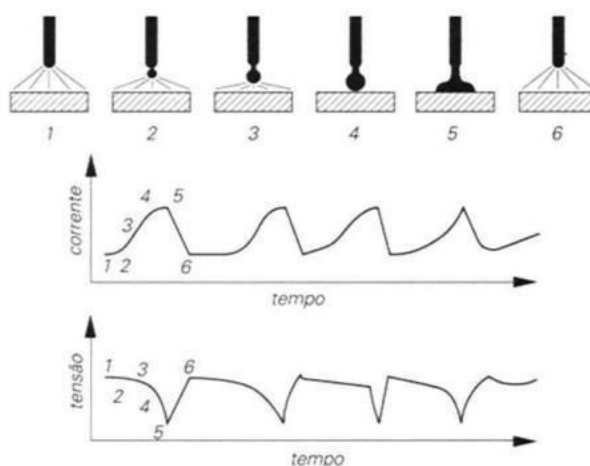
Apenas para a soldagem de materiais ferrosos, enquanto o processo MIG pode ser utilizado em materiais ferrosos ou não ferrosos, por exemplo: Alumínio, Cobre, Magnésio, Níquel e suas ligas (Santos, 2013).

O processo de solda da alavanca é por corrente contínua (CC), e, o arame na polaridade positiva, polaridade reversa, e a transferência de material se dá por três técnicas distintas: curto-circuito, globular e aerossol. O presente estudo de caso estará retratando a transferência por curto-circuito (Fogagnolo, 2011).

A transferência por curto-circuito ocorre com baixos valores de corrente e tensão e é utilizada geralmente na soldagem em posições diferentes da posição plana, soldagem de chapas finas e na soldagem de raiz de maior abertura, mostradas na Figura 20.

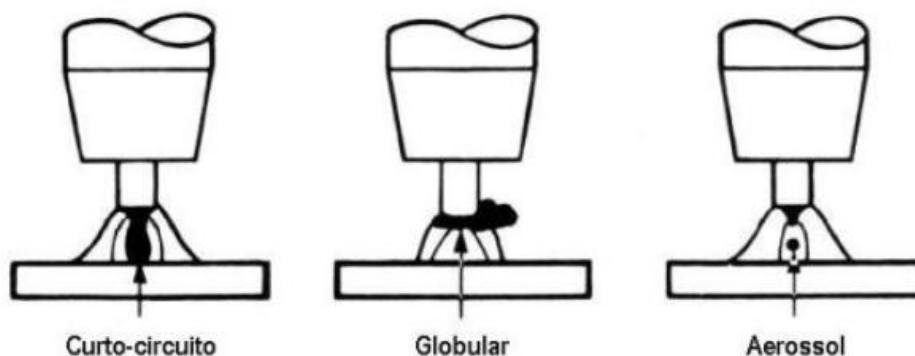
Neste tipo de transferência, no contato do metal de base com o metal fundido, a corrente aumenta a intensidade o suficiente para aquecer o eletrodo permitindo a transferência metálica, e novamente o ciclo recomeça. Nota-se, que é preciso ter velocidade controlada do incremento da corrente de curto-circuito, evitando a violenta separação da gota metálica ocasionando a dispersão da mesma. Mesmo que neste modo de transferência ocorra a formação de respingos, essa ocorrência pode ser limitada pelo ajuste da fonte de energia e pela seleção adequada dos ajustes de soldagem, deste modo, os curtos-circuitos ocorrem suavemente e a ponta do eletrodo mergulha parcialmente na cratera da poça de fusão. A Figura 21 mostra os modos de transferência de metal (Infosolda, 2024).

Figura 20: transferência por curto-circuito.



Fonte: Portal Infosoldas (2024).

Figura 21: Modos de transferência de metal de solda MIG/MAG.



Fonte: Portal Infosoldas (2024).

Os eletrodos da solda MIG/MAG são arames contínuos, ou arames sólidos, e são determinados de acordo com o tipo de material a ser soldado e o processo utilizado (MIG ou MAG).

Os eletrodos (arames) da solda MIG/MAG são determinados:

3.2.1.1 - Tipo de material a ser soldado:

Aços carbono e baixa liga → Arames como ER70S-6

Aço inoxidável → Arames como ER308L, ER316L

Alumínio (no processo MIG) → Arames como ER4045, ER5356

3.2.1.2 - Processo utilizado:

MAG (com gás ativo): Usa arames para materiais ferrosos (ex: aço carbono).

MIG (com gás inerte): Usa arames para metais não ferrosos (ex: alumínio, cobre).

3.2.1.3 - Diâmetro do arame:

Varia de 0,6 mm a 1,6 mm, conforme a espessura da peça e o tipo de soldagem.

3.2.1.4 - Normas e classificações técnicas:

AWS A5.18 (para aços carbono)

AWS A5.9 (para aço inox)

AWS A5.10 (para alumínio)

3.2.2 Metalurgia da soldagem

Geralmente, nos processos de soldagem, o calor é a principal fonte de energia, o que pode resultar em potenciais problemas, impactando diretamente as transformações metalúrgicas e os fenômenos mecânicos que ocorrem na zona de solda.

No estudo da transferência de calor em juntas soldadas devem ser considerados os seguintes fatores (Figueiredo, 2005):

Fornecimento de calor ou de energia;

Eficiência térmica do arco elétrico;

Ciclo térmico constante durante a soldagem;

Tempo de exposição nessas temperaturas;

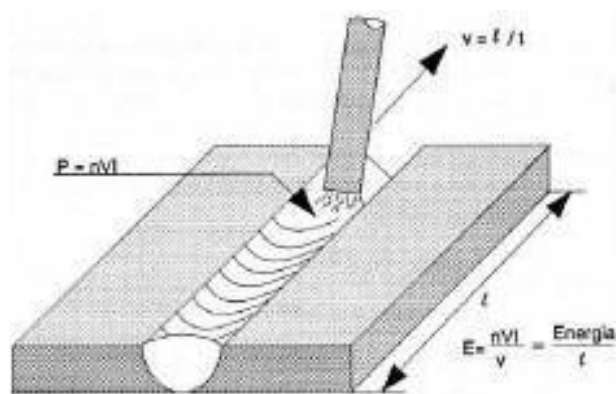
Controle da velocidade de resfriamento da solda.

Na maioria dos processos de solda por fusão, são envolvidas o uso de uma fonte de calor intensa e localizada. Por exemplo, na soldagem a arco, a intensidade pode atingir valores da ordem de $5 \times 10^8 \text{ W/m}^2$. Essa energia concentrada pode resultar em altas temperaturas em pequenas regiões, gradientes térmicos elevados (de 10^2 a $10^3 \text{ }^\circ\text{C/mm}$), variações rápidas de temperatura (de até $10^3 \text{ }^\circ\text{C/s}$), com alterações de microestrutura e propriedades em um volume reduzido de material.

De forma simplificada, o fluxo de calor na soldagem pode ser dividido em duas etapas básicas: o fornecimento de calor à junta e a dissipação desse calor pela peça. Na primeira etapa, no caso da soldagem a arco elétrico, o arco pode ser considerado a única fonte de calor, definido pela sua energia de soldagem. A energia de soldagem representa a quantidade de calor transferida para a peça por unidade de comprimento do cordão de solda, como ilustrado na Figura 22.

Figura 22: Energia de soldagem.

P é a potência dissipada no arco ($V \cdot I$), $(n \cdot V \cdot I)$ é a potência cedida à peça e l é o comprimento da solda.

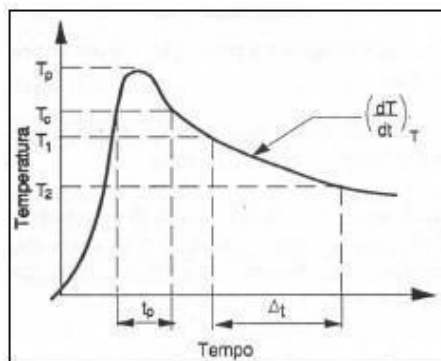


Fonte: Figueiredo (2005).

Na segunda etapa, o calor é dissipado principalmente por condução na peça, a partir das regiões aquecidas em direção ao restante do material. A variação de temperatura em diferentes pontos devido ao processo de soldagem pode ser estimada de forma teórica ou experimental, sendo o ponto próximo à junta irá ter

uma variação de temperatura devido à passagem da fonte de calor. Essa variação é representada pela curva térmica de soldagem, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23: Ciclo térmico de soldagem (esquemático).



Fonte: Figueiredo (2005).

3.2.3 Descontinuidades

Podemos definir descontinuidade como a interrupção da estrutura típica da solda, uma não homogeneidade em suas características mecânicas, metalúrgicas ou físicas. Mas é importante dizer que uma descontinuidade não é, necessariamente, um defeito (Strohaecker, 2006).

Sendo assim, ela pode ser causada pela abertura de uma trinca ou de um segundo material, como gás ou inclusão de escória. E ainda podem ser classificadas quanto à origem e a forma. Com relação a origem elas podem estar relacionadas ao projeto, ao processo ou a transformações metalúrgicas e quanto à forma, elas podem ser planas ou volumétricas (Wallner, 2001).

3.2.4 Porosidades

As descontinuidades, chamadas de porosidade, são originadas no metal de solda devido à presença de gases ou vapores aprisionados na poça de fusão, ocorrendo na etapa do processo de solidificação (Faria, 2001). Esse aprisionamento ocorre devido à diminuição da capacidade de dissolução dos gases na poça de fusão à medida que a temperatura diminui, ou devido a reações do metal de solda

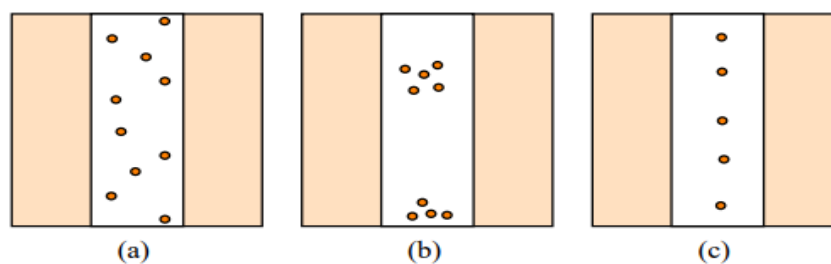
com as reações químicas desse processo. Essas descontinuidades são consideradas prejudiciais quando ultrapassam os valores estabelecidos em normas, como a DIN EN 25817/92, pois reduzem a área resistente utilizável (Strohaecker, 2006). Além disso, a presença de porosidade aberta (que aflora na superfície) exerce um efeito de concentração de tensões.

O mecanismo de formação de poros baseia-se na relação entre a velocidade da frente de solidificação e a taxa de liberação de gases ou vapores dissolvidos na poça de fusão. Quando a velocidade da frente de solidificação é maior do que a taxa de liberação dos gases/vapores (em altas velocidades de soldagem), o poro formado terá uma forma esférica (Shames, 1999). Por outro lado, quando a velocidade da frente de solidificação é igual à taxa de liberação (em velocidades de soldagem médias), o poro terá uma forma vermicular. Não ocorrerá a formação de poros quando a velocidade da frente de solidificação for menor do que a taxa de liberação (em velocidades de soldagem lentas) (Faria, 2001). Podemos ter a formação de porosidade caso ocorra supersaturação localizada, ou total, de gás na poça de fusão,

O hidrogênio, nitrogênio e dióxido de carbono são os gases que contribuem para a formação de porosidade. O hidrogênio tem sua origem na umidade presente no arame de solda ou no metal de base. O nitrogênio é proveniente da captação do ar próximo ao arco voltaico. Já o dióxido de carbono surge da combinação de oxigênio com o metal de base em aço não acalmado.

Em relação à distribuição na solda, a porosidade pode ser classificada em três tipos, Figura 24: (a) distribuída, onde ela está uniformemente espalhada; (b) agrupada, geralmente associada a pontos de abertura ou interrupção do arco; e (c) alinhada, que ocorre principalmente no passe de raiz (Nishikawa; Murakoshi; Matsuki, 1998). A descontinuidade não é desejada, devido ter uma influência direta na formação de trincas de cratera, pois apresenta microporos entre os ramos dendríticos na região da cratera, atuando como caminhos propícios à nucleação de trincas.

Figura 24: Esquema dos tipos de distribuição de porosidade: (a) distribuída, (b) agrupada, (c) alinhada.



Fonte: Modenesi (2001).

3.2.5 Trincas

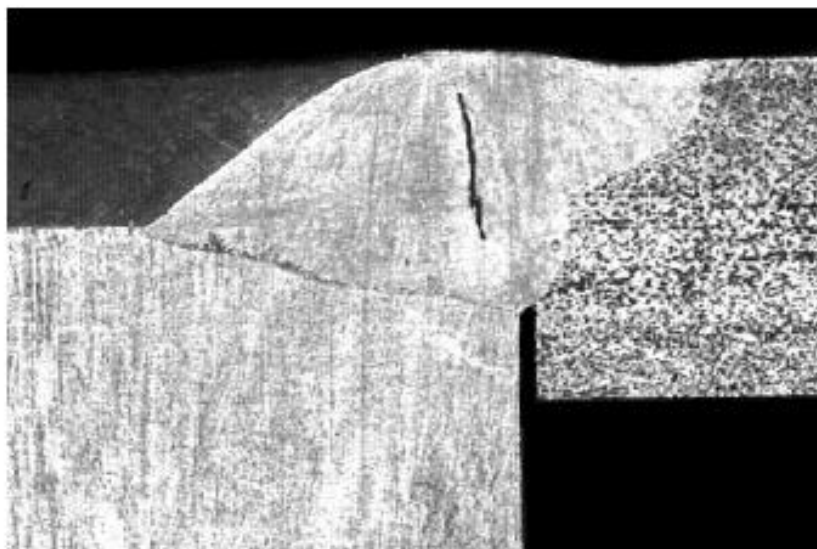
As descontinuidades da região soldada, devido estar no limite de ruptura, e quando ocorrem, tendem a se propagar por efeito da contração local na direção de propagação (Wallner, 2001), originando assim a trinca.

As etapas para ocorrer uma trinca são: contração do metal de solda, redução do volume da poça pela contração líquida, contração de solidificação e contração com a mudança de fase no estado sólido. As descontinuidades são as mais severas em soldagem, por servirem como concentradores de tensões.

Trincas iniciam-se com grande frequência em regiões de alta concentração de tensão e sob carregamento cíclico. As trincas mais frequentes conhecidas em referências bibliográficas, são as que ocorrem em estruturas por ligações soldadas (Wallner, 2001).

Na Figura 25, é mostrada uma trinca em um corpo tensionado, e essa faz que se tenha uma redistribuição de tensões próxima à mesma. O crescimento dessa trinca, obriga-se a realizar uma análise do campo de tensões a frente nessa região (Dieter; Bacon, 2012). A análise de tensões nessa região, limita-se a uma análise elástica da redistribuição das tensões, processo de forma macroscópica, sendo assim, o processo de crescimento de trinca é considerado contínuo, simplificando a abordagem.

Figura 25: Exemplo de trinca formada entre uma chapa de aço e um pino de aço.



Fonte: Modenesi (2001).

No Quadro 2 temos a classificação de trincas propostas pelas normas DIN 8524 e AWS B 1.0 e mostra que as trincas se iniciam nas soldas e nas regiões onde há descontinuidades como no caso de furos.

Quadro 2: Classificação de trincas propostas pelas normas DIN 8524 e AWS B 1.0.

Norma DIN 8524	Norma AWS B 1.0
Trinca a quente (com presença de um filme líquido) Trinca de solidificação (cratera) Trinca de liquação Trinca a frio (material totalmente no estado sólido) Trinca devido à diminuição da ductilidade Trinca devido à contração de solidificação Trinca induzida por hidrogênio Trinca lamelar	Trinca a quente, ocorre em altas temperaturas, próximo ao ponto de fusão e na solidificação da solda. Trinca a frio, associa-se à presença de hidrogênio e ocorre após a solidificação da solda.
	Trinca lamelar

Fonte: Wainer, 1995.

3.2.6 Inclusão

Essas discontinuidades no metal de solda são originadas devido ao aprisionamento ou inclusão de materiais metálicos, como o tungstênio na soldagem no processo TIG, e materiais não metálicos retidos na zona fundida, ocorrendo porque as partículas desprendidas do eletrodo e da escória, na região soldada, tem seu ponto de fusão elevado. Essas discontinuidades e as porosidades, são consideradas prejudiciais quando excedem os valores estabelecidos em normas, como a ASME/ANSI B 31.3/1987, pois reduzem a área resistente e funcionam como pontos de concentração de tensão (Wallner, 2001).

Existem duas formas principais de inclusão de escória durante a soldagem. A primeira ocorre quando há uma manipulação inadequada do eletrodo, fazendo com que parte da escória se mova à frente da poça de fusão, prendendo-a sob o cordão (Faria, 2001). Em soldagens com vários passes, a escória depositada em um passe pode não ser adequadamente removida e refundida pelo passe seguinte, resultando em sua prisão sob esse passe (Raghavan, 2017). Além disso, a remoção da escória pode ser dificultada por diversos fatores, como a formação de um cordão irregular ou o uso de um chanfro com ângulo muito fechado. O segundo tipo de inclusão chamado de inclusão de tungstênio, que pode ocorrer durante a soldagem TIG, também conhecido como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), Soldagem a Arco com Eletrodo de Tungstênio e Gás, quando o eletrodo entra em contato com a peça ou a poça de fusão, resultando na transferência de partículas de tungstênio para a solda.

As inclusões têm sua origem na presença de partículas metálicas ou não metálicas dispersas na poça de fusão, provenientes do eletrodo ou do fluxo. Essas partículas possuem um alto ponto de fusão. Na Figura 25, é mostrada o processo de solidificação, essas inclusões são enclausuradas no interior da zona fundida ou na fronteira entre a ZTA (zona termicamente afetada) e a zona fundida em soldagens com múltiplos passes (Raghavan, 2017). Devido ao seu efeito como concentradores de tensões, essas discontinuidades podem se tornar locais preferenciais para o surgimento de trincas.

Figura 26: Inclusão de escória.



Fonte: Modenesi (2001).

3.3 MECÂNICA DA FRATURA

A Mecânica da Fratura é o ramo da mecânica dos materiais que estuda como e porque os materiais trincam ou se rompem quando submetidos a tensões, e é importante para prever a falha de estruturas com trincas, fissuras ou defeitos pré-existentes.

O objetivo da Mecânica da Fratura é investigar o comportamento dos materiais com defeitos estruturais para determinar se um defeito tipo trinca irá crescer ou não para levar o componente a fratura, qual tensão é crítica para causar a fratura, como melhorar a resistência à fratura do material, determinar o grau de segurança efetivo de uma estrutura ou componente trincado (Raghavan, 2017).

O grande mérito da mecânica da fratura é a previsibilidade da falha de materiais e estruturas com a presença de trincas, microfissuras, defeitos e inclusões, permitindo ao projetista entender como as trincas iniciam, com critérios de tenacidade do material, baseados em tolerância e defeitos, tornando-se os projetos mais seguros e realistas. A mecânica da fratura aplicada à fadiga e corrosão sob tensão é fundamental para entender e prever a falha de materiais submetidos a ambientes agressivos e cíclicos, compreendendo as causas comuns de falha prematura em componentes estruturais com defeitos prévios e/ou trincas nucleadas em serviço (Wallner, 2001).

A mecânica da fratura divide-se em mecânica da fratura linear-elástica (MFLE) e mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP) (Raghavan, 2017).

A Mecânica da Fratura ganhou força impulso como ramo da Engenharia Estrutural há algumas décadas, impulsionada pela necessidade de compreender e prever falhas catastróficas em materiais que apresentavam trincas ou defeitos internos em obras de Engenharia. Seu desenvolvimento foi crucial após acidentes industriais e aeronáuticos que demonstraram as limitações da resistência dos materiais tradicionais, especialmente em estruturas cíclicas (Kanninen, 1985).

Broek (1986) observa que estruturas construídas com materiais de alta resistência mecânica, frequentemente apresentam baixa tenacidade à fratura, o que se torna vulneráveis à falha súbita. Mesmo apresentando elevados limites de resistência à tração, esses materiais podem romper de forma frágil quando contém trincas ou defeitos, falhando sob níveis de tensão significativamente inferiores àqueles previstos no projeto.

Uma vez que falhas ou fissuras são inevitáveis nos materiais do ponto de vista prático, as estruturas de engenharia devem ser avaliadas quanto à sua segurança e vida útil com base na presença de tais imperfeições. A consideração de defeitos pré-existentes no projeto e na análise estrutural é essencial para garantir a integridade, confiabilidade e durabilidade ao longo do tempo, com foco na preservação e da conservação.

A Mecânica da Fratura baseia-se em critérios de tolerância e defeitos, sendo eficientes para a avaliação da Tolerância de Dano em componentes estruturais, com base no conhecimento prévio de parâmetros mecânicos associados à iniciação e propagação de fissuras, bem como o colapso final do material (Dieter; Bacon, 2012).

3.3.1 Fadiga em juntas soldadas

No vocabulário da engenharia, o termo fadiga do material significa mudanças nas propriedades do material as quais podem ocorrer sob repetidos ciclos de carregamento e descarregamento. Essas mudanças causam uma falha prematura e inesperada sob níveis de tensões abaixo dos estabelecidos em projeto (Raghavan, 2017).

O fenômeno da fratura sob fadiga tornou-se proeminente com a chamada revolução industrial do século XIX, e esse critério desenvolveu-se devido ao grande número de acidentes ocorridos nesse período em máquinas a vapor e locomotivas. Estimativas dessa época relatam cerca de duzentas mortes por ano na Inglaterra no período de 1860 a 1870 em acidentes ferroviários decorrentes de falhas por fratura, o que é muito para uma época em que somente uma pequena parte da população tinha acesso a este tipo de transporte (Raghavan, 2017).

Fadiga refere-se ao processo de degradação das propriedades mecânicas de um material ou componente, levando à fratura sob um carregamento cíclico. Essa definição não inclui o fenômeno da fadiga estática, que é ocasionalmente utilizado para descrever a fratura em vidros ou cerâmicas devido à tensão e corrosão na presença de umidade (Wallner, 2001).

Normalmente, em serviço, a ruptura de componentes metálicos ocorre de forma progressiva, sendo precedida pela nucleação e propagação de trincas, com cargas cíclicas e tensão máxima bastante inferior ao limite de escoamento do material, ocorrendo a falha após um elevado número de ciclos com pouca deformação macroscópica. Considera-se, então, esta falha como sendo fadiga de alto ciclo, regida pela tensão. A fadiga é responsável por 80 a 90% das falhas mecânicas em máquinas e equipamentos, sendo que para ocorrer, esse processo é dividido em três etapas: nucleação da trinca por solicitações dinâmicas, propagação da trinca por demanda de tração e fratura final com deformação plástica. (Strohaecker, 2006).

Comumente, é possível identificar a superfície fraturada por fadiga por meio de características macroscópicas, como as marcas de praia. Os principais indícios dessa forma de fratura incluem o ponto de início da trinca de fadiga (geralmente na superfície), a região de propagação da trinca que exibe as marcas de praia e a região de fratura rápida onde a trinca finalmente atinge sua extensão crítica. É importante ressaltar que a falha por fadiga ocorre normalmente em níveis de tensão significativamente abaixo do limite de resistência observado em carregamentos monotônicos (Wallner, 2001).

A resistência à fadiga refere-se à capacidade de um material resistir a condições de carregamento cíclico. Tradicionalmente, as propriedades dos materiais no regime elástico sob fadiga são representadas pela curva S-N ou curva de Wöhler (Dieter; Bacon, 2012). Em aços, é observada a existência de um patamar abaixo do qual a peça não se rompe, independentemente do número de ciclos. Esse valor de tensão é conhecido como limite de fadiga (Raghavan, 2017). Em aços de alta resistência, ligas de alumínio e outros materiais não é possível determinar o limite de fadiga, no entanto, onde o limite de fadiga possui tensões elevadas, pode-se determinar essa resistência.

3.4 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS - AEF

A Análise de Elementos Finitos - FEA permite modelar e prever o comportamento de estruturas e produtos sob diversas condições de carregamento, geometria e propriedades físicas, permitindo a simulação realista associadas à mecânica da fratura. O Método de Elementos Finitos (FEM) é usado por engenheiros e cientistas para modelar matematicamente e resolver numericamente problemas complexos estruturais, de multifísica e fluidos (Cook; Malkus; Plesha, 2018), sendo a FEA a aplicação prática desse método.

O FEA pode ser usado em uma ampla variedade de setores, mas é mais comumente utilizado no setor aeronáutico, biomecânico e automotivo.

Um modelo de elementos finitos divide uma estrutura contínua em pequenas partes chamadas elementos finitos, interligados por nós, que formam a malha de elementos finitos e contêm o material e as propriedades estruturais do modelo. Em cada elemento, as equações do problema físico (mecânico, térmico, elétrico, etc) são resolvidas aproximadamente, e os resultados são combinados para representar a resposta do sistema completo.

A densidade da malha de elementos finitos, ou seja, o tamanho e número dos elementos usados na discretização da geometria, pode variar ao longo de todo o material, dependendo da alteração prevista em níveis de estresse de uma determinada área. Regiões que sofrem grandes alterações no estresse geralmente

exigem uma maior densidade de malha do que aqueles que passam por pouco ou nenhum estresse. Os pontos de interesse podem incluir pontos de fratura de materiais previamente testados, filetes, cantos, detalhes complexos e áreas de alto estresse (Cook; Malkus; Plesha, 2018).

3.4.1. Tensão de Von Mises

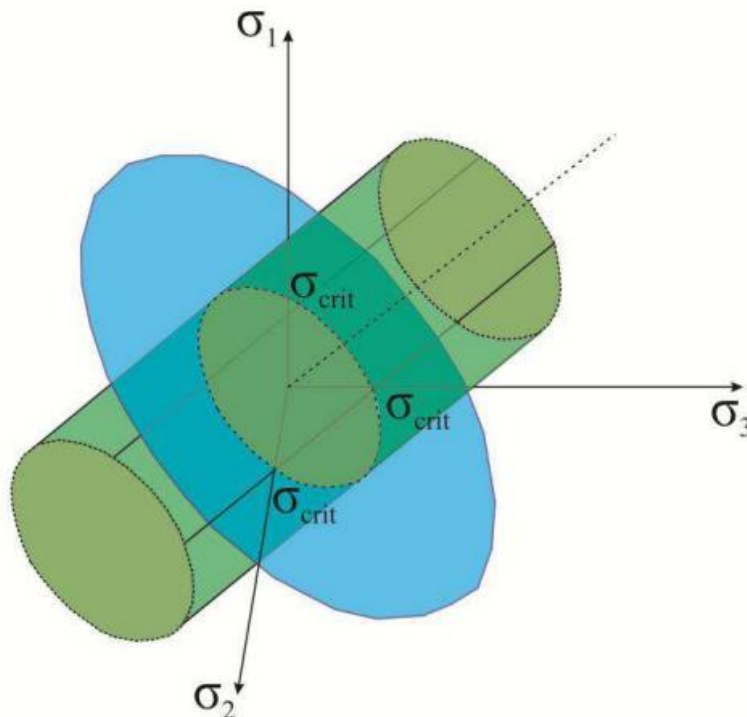
Existem alguns critérios de falhas mecânicas que são utilizados para verificar a proximidade de falha plástica do material, e essa proximidade é a iminência de ocorrer a falha plástica quando da ocorrência de um determinado estresse mecânico, e dentre os critérios que são utilizados, dois podem ser destacados: o critério do máximo estresse mecânico e o critério de Von Mises. O critério de tensão de von Mises máxima, ou tensão de Von Mises, é amplamente utilizado em análise de materiais dúcteis, é baseado na teoria de von Mises-Hencky, também conhecida como máxima energia de distorção ou de cisalhamento, considerando que a falha plástica ocorrerá se o estresse mecânico ocorrente, que é o estresse de Von Mises, for superior ao estresse crítico que o material suporta. Nos termos das tensões principais σ_1 , σ_2 , σ_3 , a tensão de Von Mises é expressa na equação 4, e essa equação resulta no cilindro elíptico apresentado na Figura 26, onde o interior do cilindro representa a região em que não ocorre falha plástica no material.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (4)$$

Essa teoria é usada para prever o início de escoamento dos materiais dúcteis, e afirma que o escoamento começa em um local onde a tensão de von Mises se torna igual ao limite de tensão, sendo considerado o limite de escoamento como limite de tensão na maioria dos casos. Entretanto, o software permite usar a tração máxima ou definir seu próprio limite de tensão (Solidworks, 2021).

$$\sigma_{VonMises} \geq \sigma_{limite}$$

Figura 27: Cilindro elíptico que representa a região em que não ocorre falha plástica no material.



Fonte: Branco (1985).

3.5 ERGONOMIA

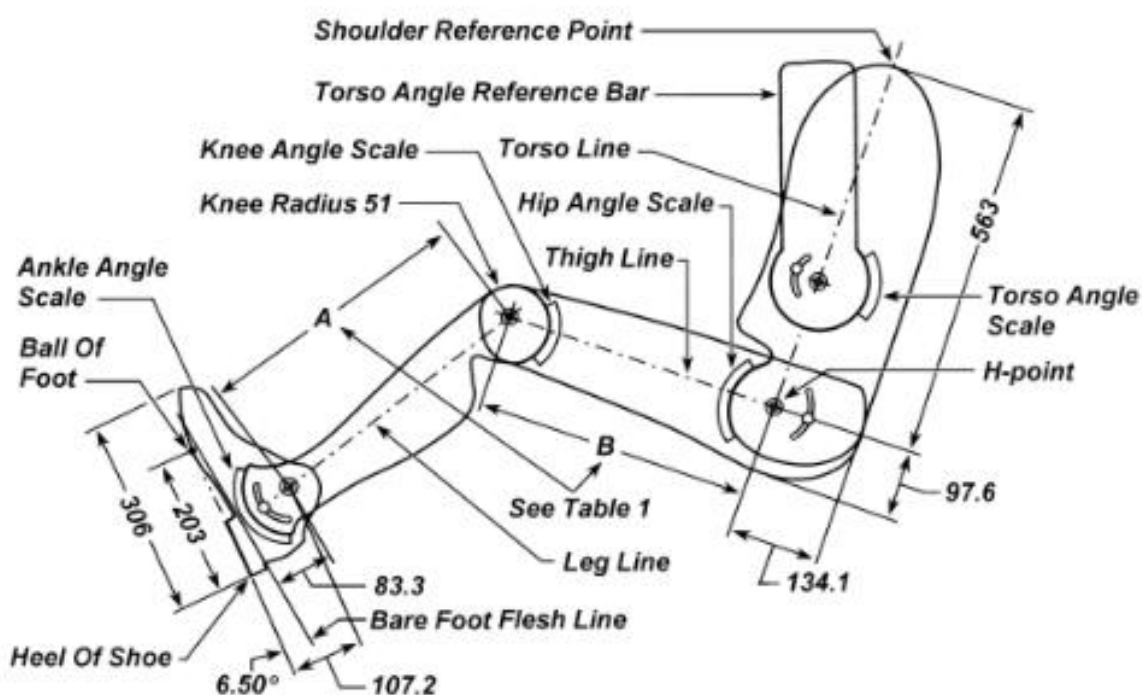
3.5.1 Norma SAE J826

A norma SAE J826 é uma concepção técnica estabelecida pela Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE), uma organização internacional que desenvolve padrões e normas para a indústria automotiva. A SAE J826 trata especificamente de manequins antropomórficos, ou bonecos de teste antropomórficos, usados em testes de segurança automotiva. Essa norma estabelece os requisitos e as dimensões que são usados em testes de impacto e específicos em veículos automotivos. Esses manequins são específicos para representar com precisão a anatomia humana em termos de tamanho, forma e densidade. Com isso, garantir que a peça atenda a Norma SAE J826 é propor a aplicação de princípios ergonômicos na concepção de

equipamentos e sistemas para melhoria do conforto, da segurança e do desempenho humano.

Dessa forma, o estudo ergonômico se baseia nos critérios das coordenadas X-Y-Z em relação a posição da alavanca de repouso e a posição dos engates de marcha aos componentes do veículo em relação a posição do motorista, tais como volante, assoalho, banco do motorista e painel de instrumentos, a fim de adaptar o comprimento da alavanca de forma que a utilização ficasse confortável para o desempenho da atividade, de acordo com a Figura 27.

Figura 28: Posição ergonômica baseada na SAE J826.



Fonte: SAE J826 (2008).

4. METODOLOGIA

O desenvolvimento da alavanca de marchas para ônibus, foi realizado em uma montadora de veículos comerciais, tendo como premissa, seu acionamento sendo do tipo comando direto, destinado ao mercado de ônibus mexicano, que vamos chamar de Furacão.

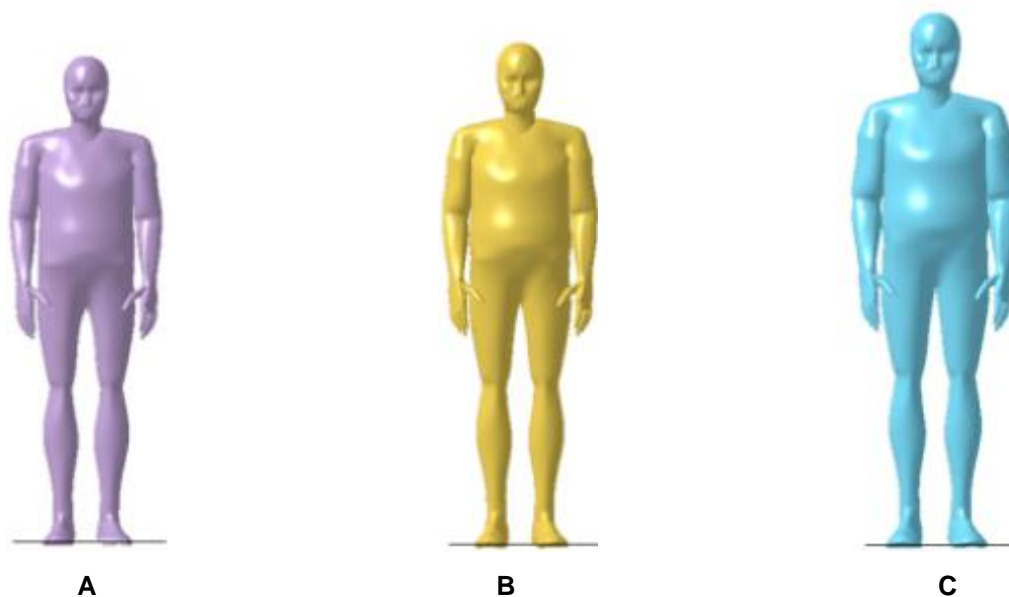
O trabalho foi desenvolvido em etapas: definição do design da alavanca, levantamento de dados dos carregamentos da aplicação, análise de elementos finitos, definição do material e validação do design da alavanca, confecção do protótipo, certificação e caracterização não destrutiva e destrutiva da alavanca.

4.1 DEFINIÇÃO DO DESIGN

Para esse estudo ergonômico, um dos quesitos utilizados para construção do manequim, é a determinação das dimensões do corpo com base na tipologia e estatística. Esses dados são fornecidos por estudos de mercado por consultorias e associações, para esse estudo foi realizado o levantamento de dados de 719 motoristas de caminhão brasileiros. Através do tratamento estatístico, obteve-se a média, o desvio padrão e os percentis 5%, 20%, 80% e 95% de cada dimensão corporal analisada (Borguesani, 2022).

Esses dados fazem a correlação da altura x % atendida da população, como mostram a Figura 29, onde: a) altura 1685 mm 5 percentis da população; b) altura 1725 mm 50 percentis da população; c) altura 1825 mm 95 percentis da população.

Figura 29: Percentil da tipologia do perfil do motorista.



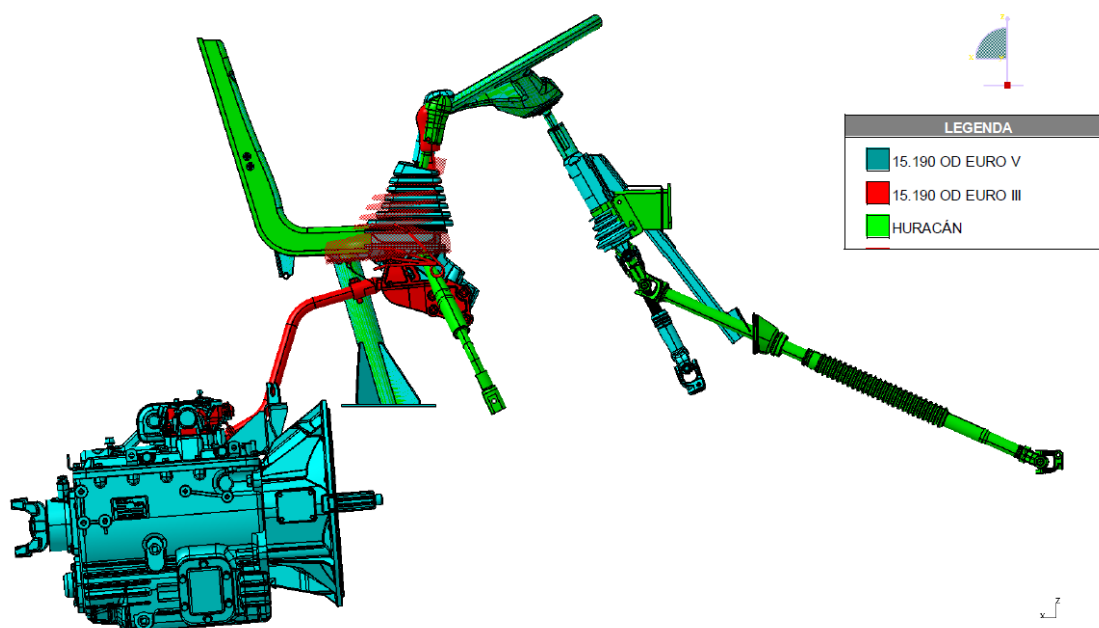
Fonte: Autor (2024).

Com a definição do perfil do motorista, foi iniciado projeto do design da alavanca para atender 3 pontos principais: centro do volante com coluna de direção, posição do banco do motorista em relação ao assoalho do veículo com a alavanca de engate na posição de neutro.

No software RAMSIS – Simulação de Manequim e Ergonomia 3D, foi feita a simulação dos pontos mencionados com o manequim, onde foram observadas as movimentações do corpo humano para o acionamento dos sistemas envolvidos, como os engates de marchas, acionamento da embreagem e movimentação do volante.

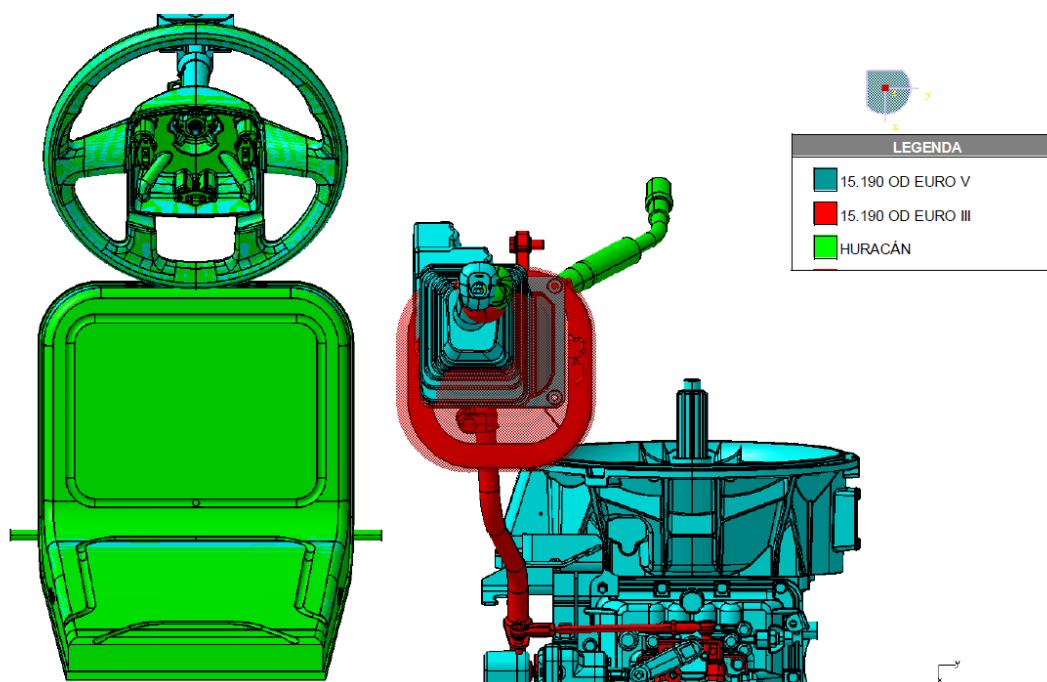
Nas Figuras 30, 31 e 32 são apresentadas as vistas da configuração proposta para o veículo Huracán baseadas nos modelos existentes de ônibus da montadora, Euro III e V.

Figura 30: Vista lateral – Design ergonômico do sistema de acionamento de marchas do veículo Huracán.



Fonte: Autor (2024).

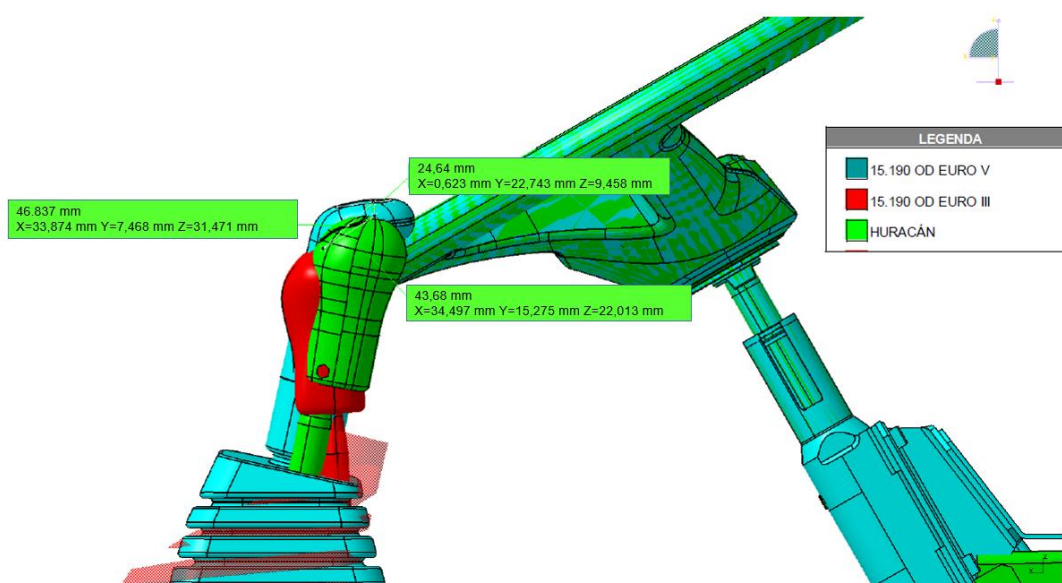
Figura 31: Vista superior – Design ergonômico do sistema de acionamento de marchas do veículo Huracán.



Fonte: Autor (2022).

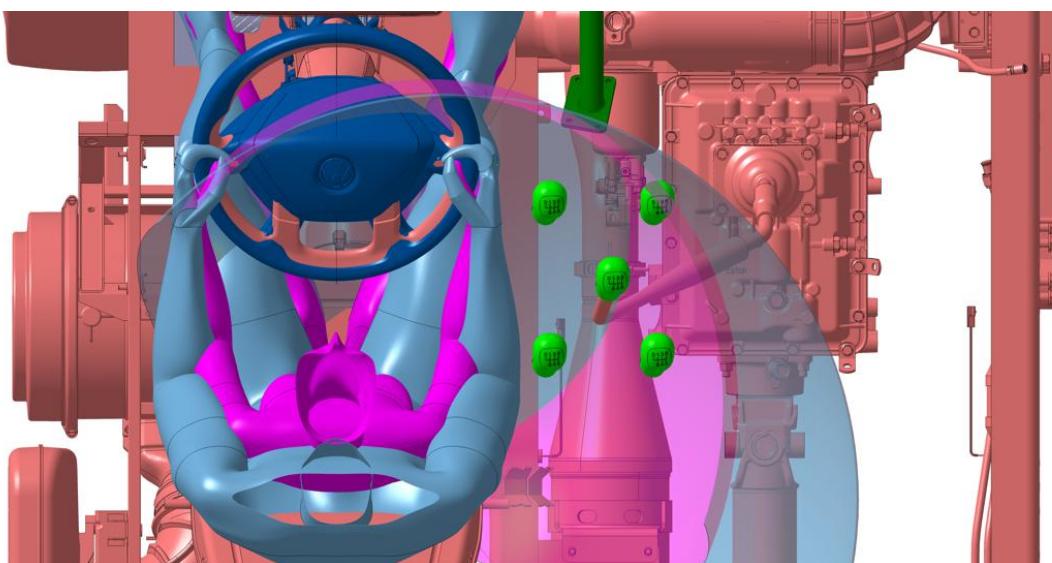
Na Figura 33 é apresentada a interface da alavanca de engate de marchas, com suas respectivas posições e o perfil do menor e do maior motorista atendendo 95 percentis da população. Nesses perfis morfológicos foram traçados uma circunferência afim de verificar o alcance do braço na maior distância, nesse caso a 5ª marcha, e atendendo o menor motorista.

Figura 32: Vista lateral – Design ergonômico da alavanca do acionamento de marchas do veículo Huracán.



Fonte: Autor (2022).

Figura 33: Perfil do menor (rosa) e maior motorista (cinza).



Fonte: Autor (2022).

4.2 ANÁLISE ESTRUTURAL

Para a análise estrutural foi utilizado Método dos Elementos Finitos (MEF) que seguiu alguns passos e procedimentos para uma completa compreensão dos acontecimentos físicos atuantes para os modelos designs propostos.

Os passos numa análise de MEF são praticamente sempre os mesmos: primeiramente subdividir o domínio do problema em subdomínios de dimensões finitas, em que o conjunto de todos os subdomínios seja igual ao domínio original, e tal compreensão indicará o caminho a se tomar.

Em seguida, para cada subdomínio, isoladamente, adotou-se um comportamento aproximado, local, para as incógnitas do problema.

Etapas do estudo de elementos finitos da alavanca:

- modelo CAD (Computer Aided-Design) do design da alavanca a ser analisada;
- definição das propriedades do material;
- definição das cargas e condições de restrição;
- definição do tipo de análise;
- processamento da análise;
- verificação dos resultados, pós-processamento de tensão, deformação e deslocamento;

4.2.1 Modelo CAD

Para o caso analisado, especificamente, haviam três geometrias propostas geradas em CAD 3D que possibilitou a construção dos modelos de estudo de elementos finitos. Os modelos CAD foram criados e fornecidos com geometrias que se adequassem ao estudo ergonômico.

Definição das propriedades do material:

Nas Figuras 34, 35 e 36 são mostradas três propostas iniciais de design da alavanca de marchas atendendo os requisitos ergonômicos. Os materiais específicos para cada componente foram baseados no histórico de construção de alavancas conhecidas. Para cada material especificado, suas propriedades mecânicas foram definidas para que o material não falhasse durante sua utilização em campo.

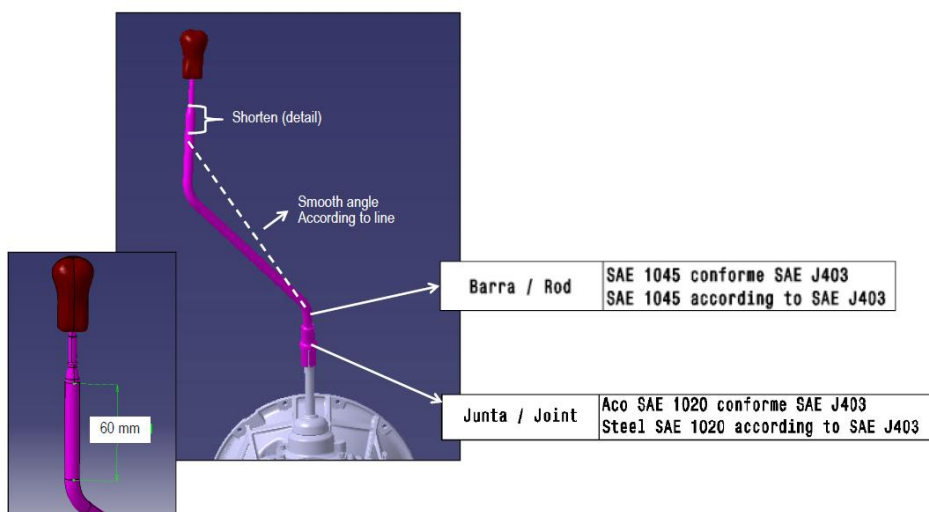
Na tabela 1, são apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais a serem utilizadas nas alavancas propostas.

Tabela 1: Tensões de escoamento.

AÇO	σ_E
SAE 1020 HR (junta)	330 MPa
DIN 1035 E235 +A (barra)	315 MPa
SAE 1045	515 MPa

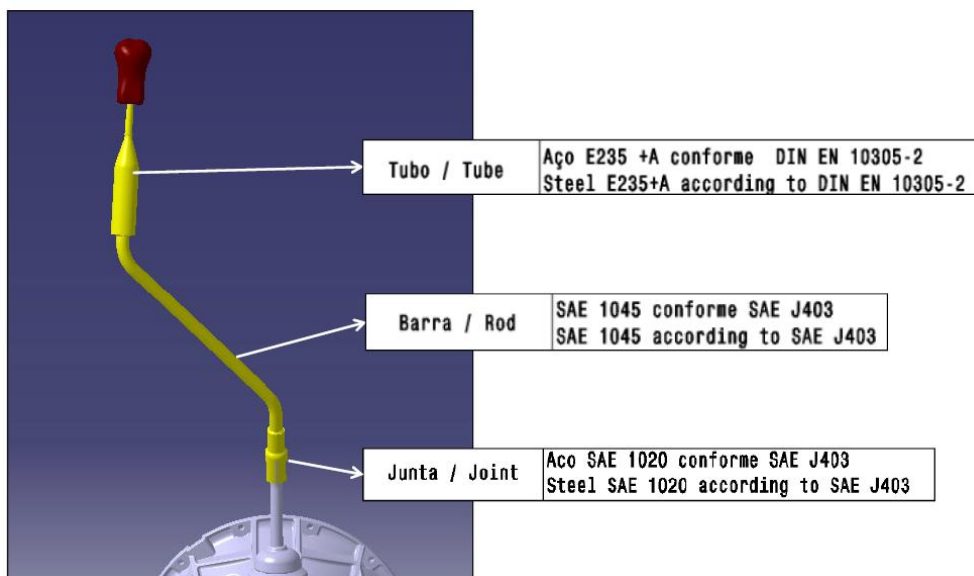
Fonte: Autor (2024).

Figura 34: Proposta design 1 com barra maciça.



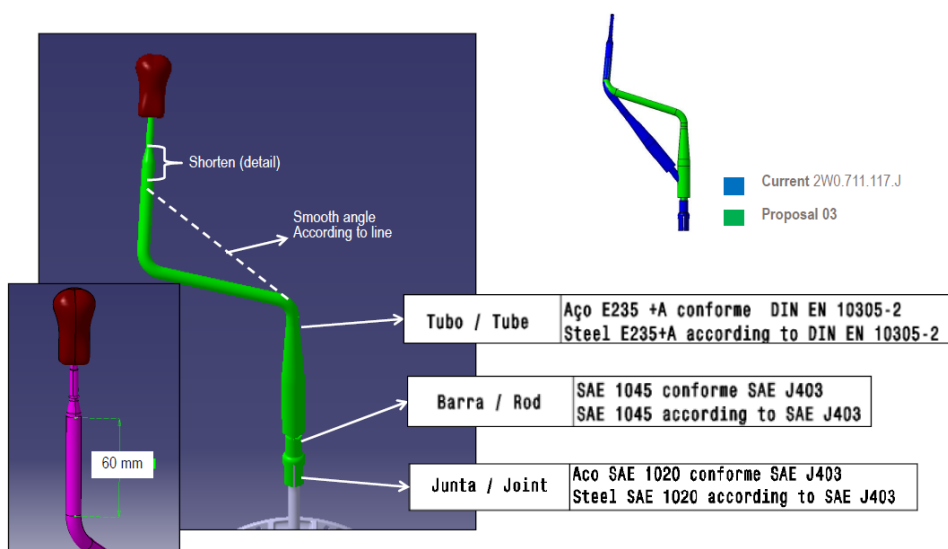
Fonte: Autor (2022).

Figura 35: Proposta design 2 com tubo e barra maciça.



Fonte: Autor (2022).

Figura 36: Proposta design 3 com tubo e barra.



Fonte: Autor (2022).

4.2.2 Definição das cargas e condições de restrição

Baseado em dados reais de aplicações conhecidas em campo, utilizou-se cargas conforme tabela 2. A Figura 37 mostra as posições da alavanca de engate para realizar as trocas de marchas, sendo forças em duas direções e dois sentidos. Essas forças são obtidas através de instrumentação utilizando célula de carga na

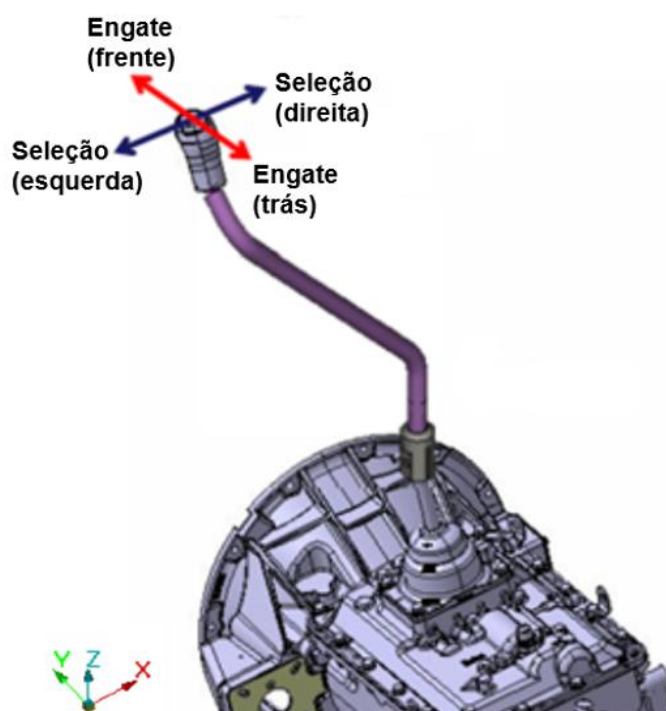
ponta da alavanca de marcha, Figura 38, utilizou-se a 1ª, 2ª e 3ª marchas, pois são as marchas que possuem maiores inércias em sua sincronização, resultando no maior esforço para a troca em relação às outras marchas. Na Figura 39, temos o resultado da aquisição realizada com a célula de carga.

Tabela 2: Cargas aplicadas na alavanca.

Posição da alavanca	Força aplicada na alavanca [kgf]	
Engate	47 (frente)	47 (trás)
Seleção	15 (direita)	24 (esquerda)

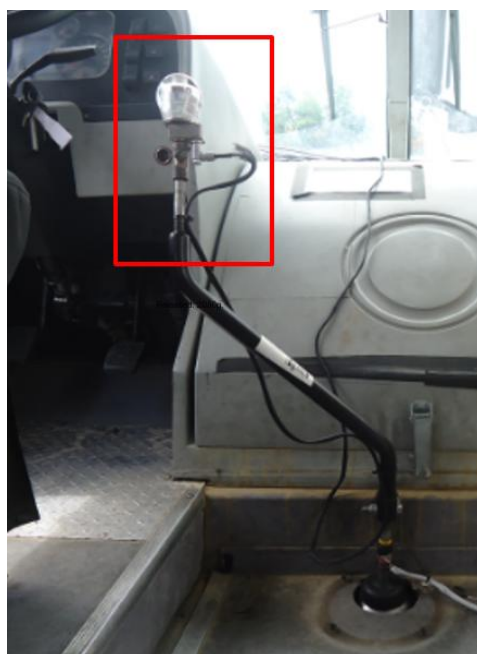
Fonte: Autor (2022).

Figura 37: Posições da alavanca de marchas – Engate e seleção.



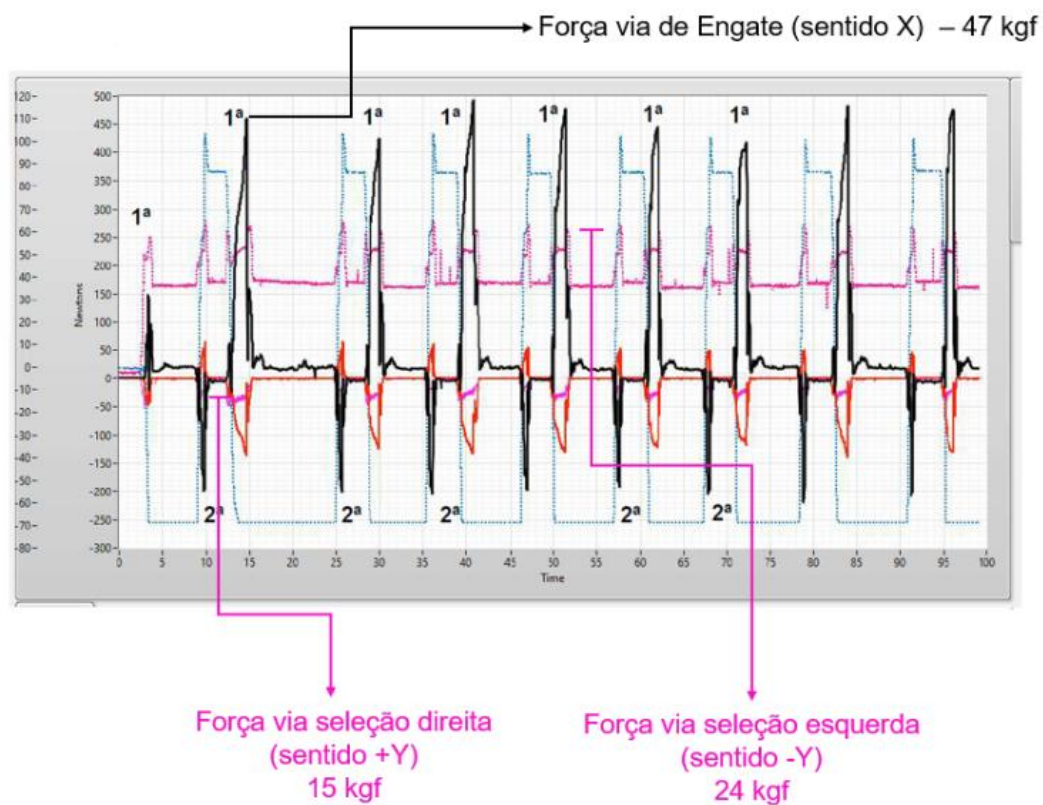
Fonte: Autor (2022).

Figura 38: Célula de carga na alavanca para aquisição dos carregamentos dos engates de marcha.



Fonte: Autor (2022).

Figura 39: Resultados das aquisições dos carregamentos na alavanca de engate.



Fonte: Autor (2022).

4.2.3 Definir o tipo de análise

As análises ocorreram dentro do regime linear estático, que considera que as forças aplicadas e os deslocamentos possuem uma relação linear, uma vez que a carga gerada não se altera com o tempo, nesse caso os carregamentos foram constantes.

4.2.4 Processamento da análise

A fim de processar modelos e obter resultados, os carregamentos, restrições e propriedades dos materiais foram imputadas no software de processamento, nesse caso, foi utilizado o ABAQUS CAE (Dassaut Systems, 2024).

4.2.5 Pós-processamento dos resultados

Uma vez processados os modelos, precisam ser verificados as tensões principais, tensões de Von Mises e os deslocamentos em x, y e z.

Como a análise é linear estática, realizada dentro do regime elástico, as deformações não são verificadas.

Para o regime elástico, o fator limitante para aprovação foi aquele em que a tensão de Von Mises não atinja o limite de escoamento do material. Desse modo, estando abaixo do limite de escoamento e ainda dentro do regime elástico, cada seção da alavanca necessita ser analisado individualmente.

Para critério de aprovação de projeto (C.P), a tensão máxima de Von Mises deverá ser menor que a tensão de escoamento do material base, ou seja, maior que 1, de acordo com a equação (4):

$$C.P = \frac{\sigma E}{TVM} > 1 \quad (4)$$

Onde:

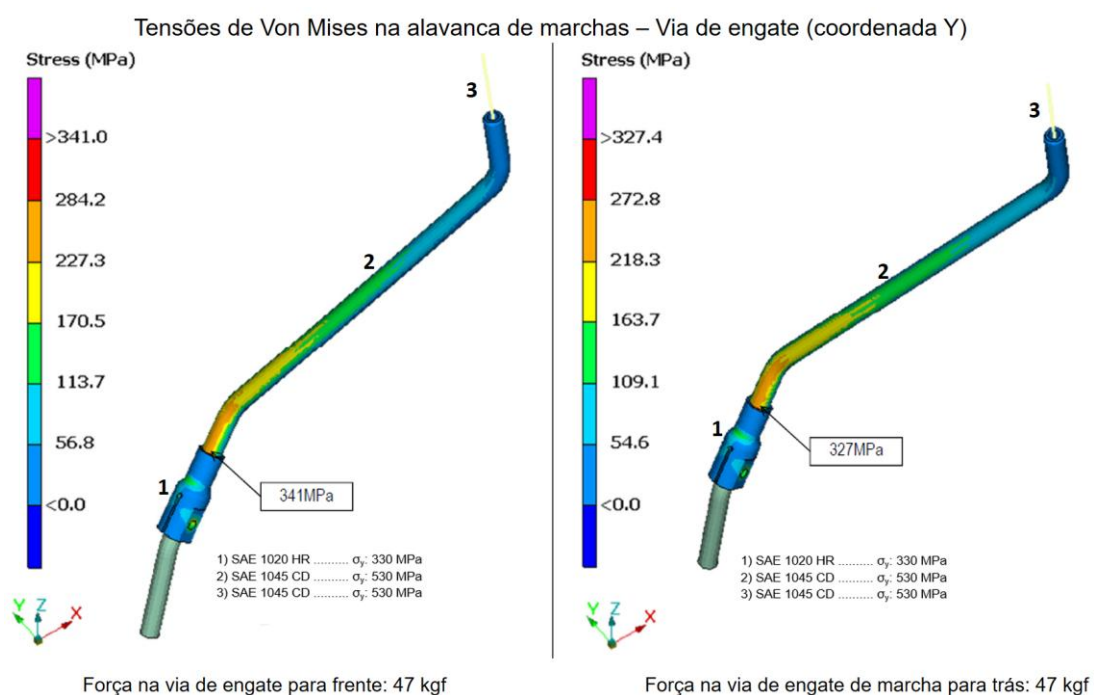
C.P – critério de aprovação de projeto;

σ_E - tensão de escoamento do material;

TVM - tensão de Von Mises.

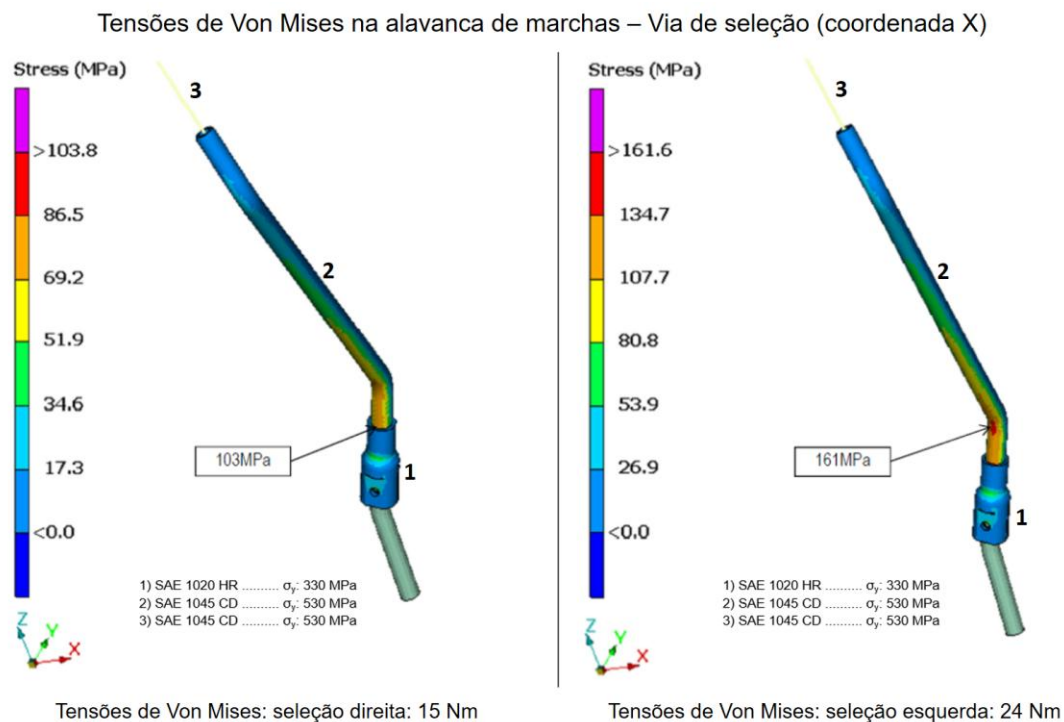
As Figuras 40 a 45 mostram como se comportam as seções da alavanca com as propostas de design 1, 2 e 3.

Figura 40: Resultado FEA design 1 – Engate.



Fonte: Autor (2022).

Figura 41: Resultado FEA design 1 – Seleção.



Fonte: Autor (2022).

Na tabela 3, temos o Critério de aprovação projeto (C.P) e as tensões de Von Mises encontradas na proposta de design 1, onde foi aprovada.

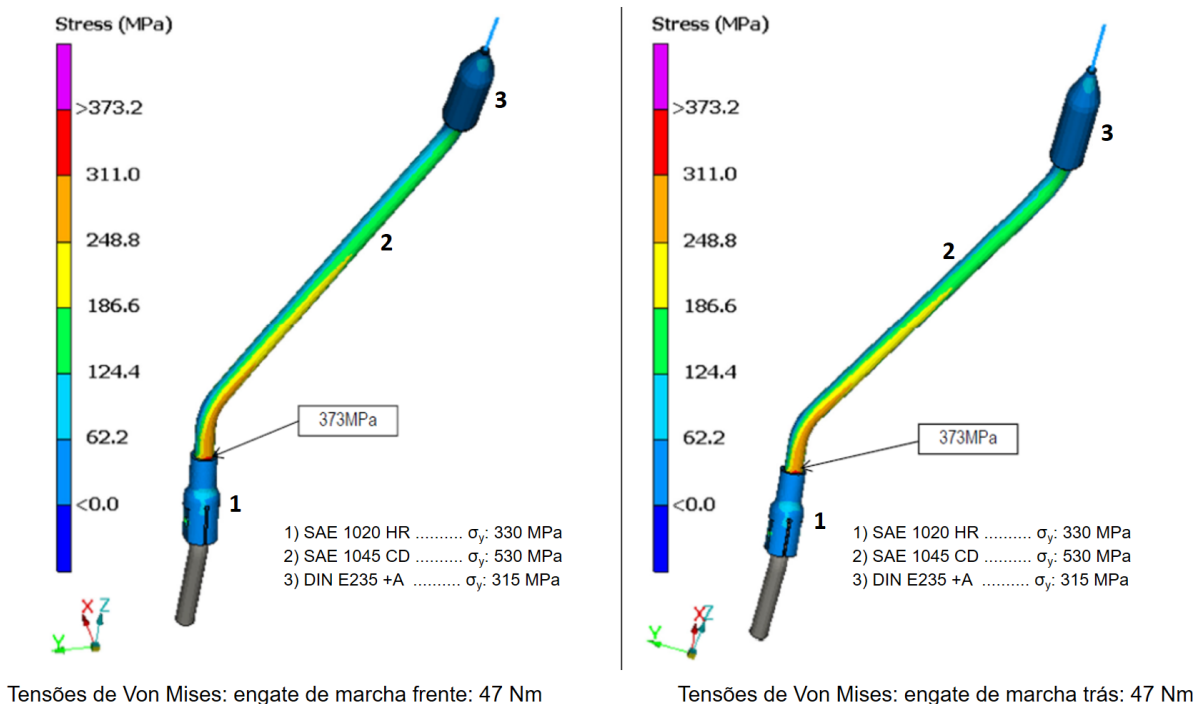
Tabela 3 – Critério de aprovação de projeto (C.P) – Design 1.

Proposta design 1 – Aprovada						
Seção	σ_y	posição engate		posição seleção		Critério de projeto
		frente	trás	esquerd a	direita	
1- Junta	330 MPa	1,2	1,3	7,1	4,2	C.P > 1
2- Barra central	530 MPa	1,5	1,6	5,0	3,2	
3- Barra final	530 MPa	2,9	3,1	3,2	2,7	

Fonte: Autor (2022).

Figura 42: Resultado FEA design 2 – Engate.

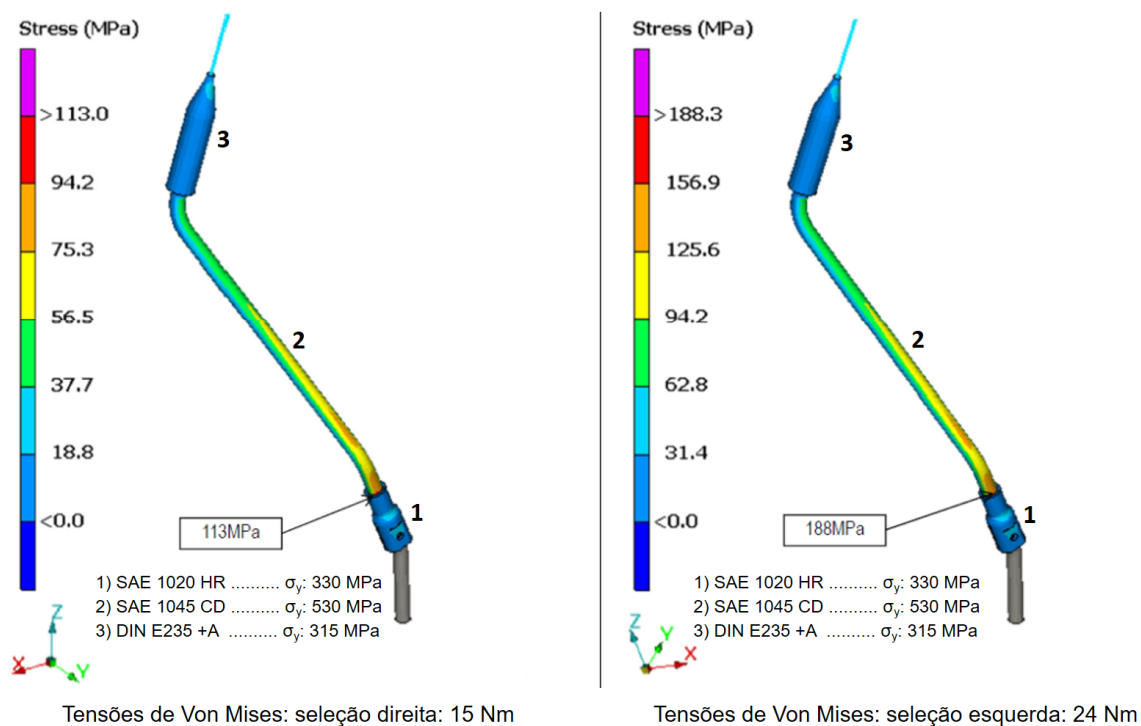
Tensões de Von Mises na alavanca de marchas – Via de engate (coordenada Y)



Fonte: Autor (2022).

Figura 43: Resultado FEA design 2 – Seleção.

Tensões de Von Mises na alavanca de marchas – Via de seleção (coordenada X)



Fonte: Autor (2022).

Na tabela 4, temos o Critério de aprovação projeto (C.P) e as tensões de Von Mises encontradas na proposta de design 2, onde foi aprovada.

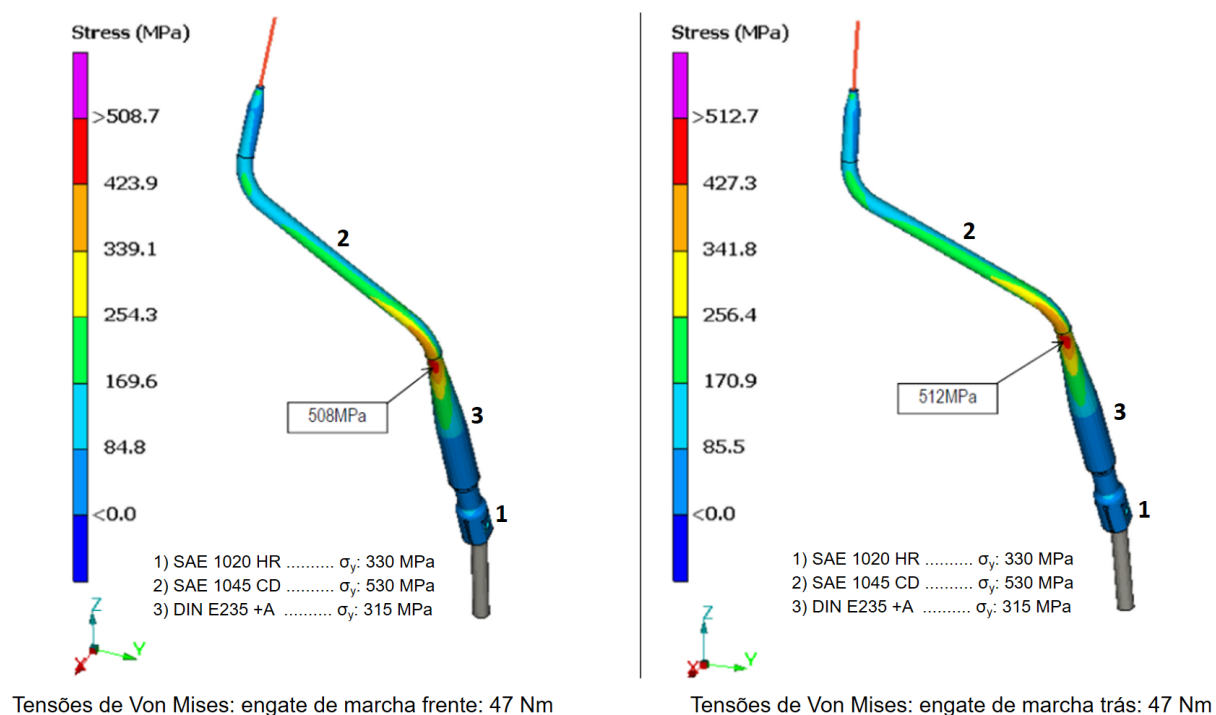
Tabela 4 – Critério de aprovação de projeto (C.P) – Design 2.

Proposta design 2 – Aprovada						
Seção	σ_y	posição engate		posição seleção		Critério de projeto
		frente	trás	esquerda	direita	
1- Junta	330 MPa	1,7	1,7	9,4	5,8	C.P > 1
2- Barra central	530 MPa	1,4	1,4	4,7	2,8	
3- Tubo	315 MPa	2,5	2,5	7,8	4,7	

Fonte: Autor (2022).

Figura 44: Resultado FEA design 3 – Engate.

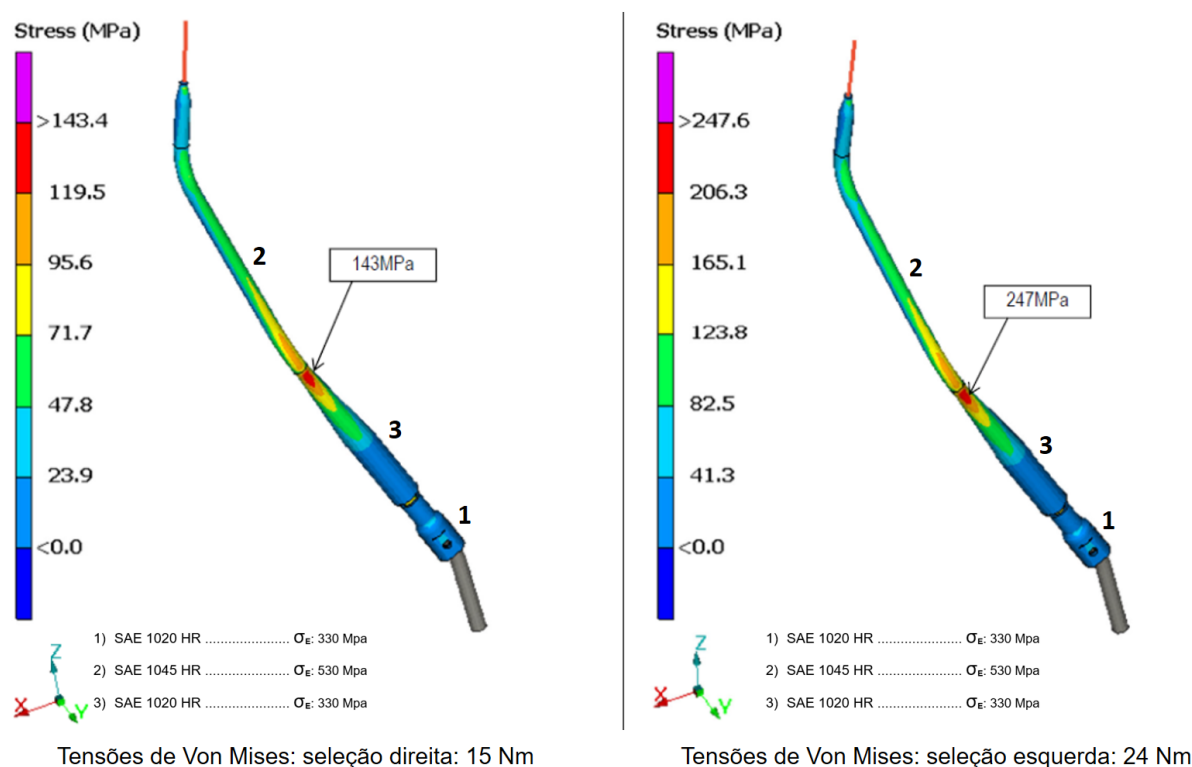
Tensões de Von Mises na alavanca de marchas – Via de engate (coordenada Y)



Fonte: Autor (2022).

Figura 45: Resultado FEA design 3 – Seleção.

Tensões de Von Mises na alavanca de marchas – Via de seleção (coordenada X)



Fonte: Autor (2022).

Na tabela 5, temos o critério de aprovação projeto (C.P) e as tensões de Von Mises encontradas na proposta de design 3, observa-se que ficou reprovada na posição de engate em ambos sentidos.

Tabela 5 – Critério de aprovação de projeto (C.P) – Design 3.

Proposta design 3 - Reprovada						
Seção	σ_y	posição engate		posição seleção		Critério de projeto
		frente	trás	esquerda	direita	
1- Junta	330 MPa	1,7	1,7	9,2	5,5	C.P > 1
2- Barra central	530 MPa	1,5	1,5	5,3	3,1	
3- Tubo	315 MPa	0,6	0,6	1,3	2,2	

Fonte: Autor (2024).

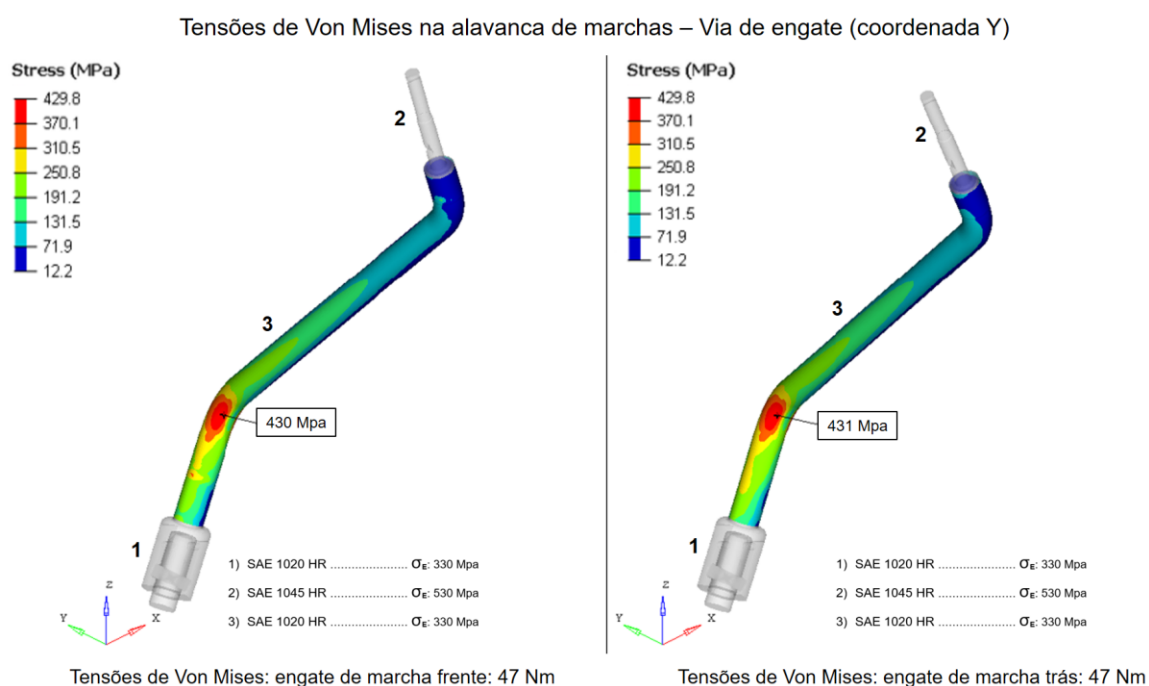
Finalizado o estudo de FEA das três propostas de design, foi escolhido o design 1 devido ser o menos complexo para a fabricação, tendo menos interfaces com soldas e usinagens.

4.2.6 Redefinição do material

A partir da definição do design 1, as especificações de projeto foram enviadas para o fabricante, localizado no México, para confecção do primeiro protótipo para certificação. Entretanto, o fabricante sugeriu utilizar um tubo de aço SAE 1020 HR no lugar na barra de aço 1045, com tensão de escoamento de 330 MPa, mantendo o mesmo design.

Como teve alteração do material e a seção de barra para tubo, realizou-se FEA novamente, Figura 45. O material sugerido não atendeu o critério de projeto como mostrado na tabela 6, sendo reprovado na via de engate.

Figura 46: Resultado FEA design 1 - Aço SAE 1020 HR – Engate.



Fonte: Autor (2022).

Tabela 6 – Critério de aprovação de projeto (C.P) – Aço SAE 1020 HR - Design 1.

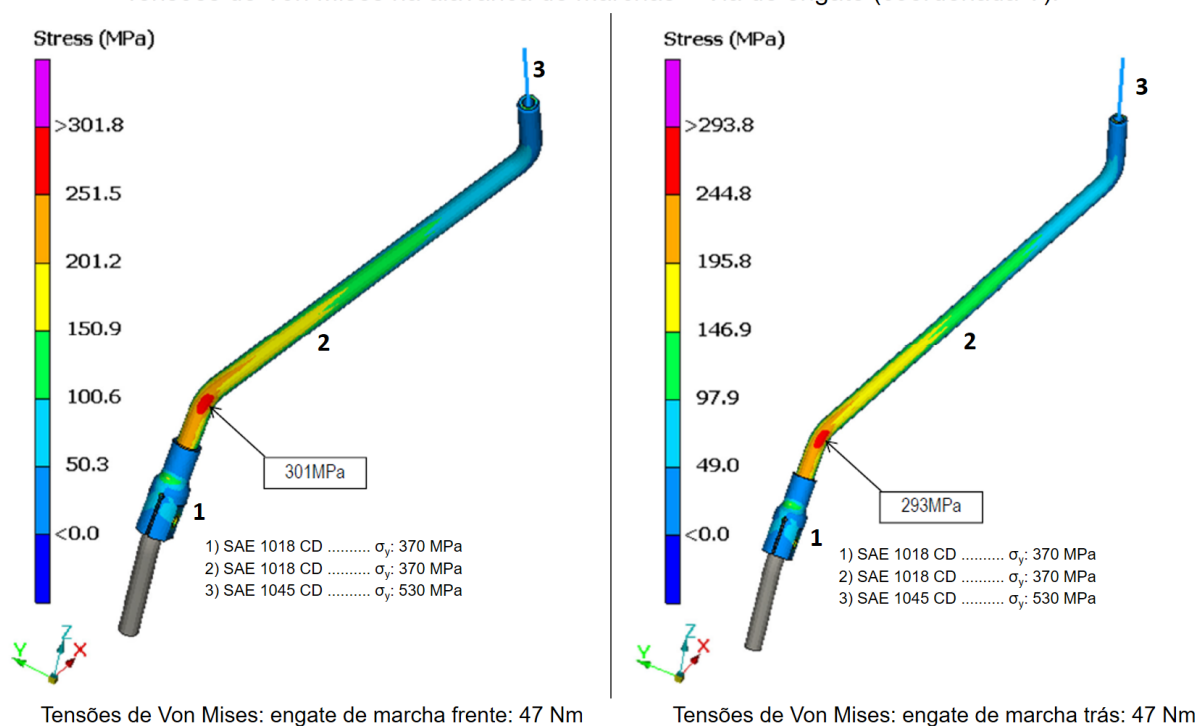
FEA aço 1020 HR - Design 1 - Reprovada				
Seção	σ_y	posição engate		Critério de projeto
		frente	trás	
3 - Tubo	330 MPa	0,7	0,7	C.P > 1

Fonte: Autor (2022).

Após a reprovação no FEA, definiu-se um aço com disponibilidade e baixo custo no México, sendo escolhido novamente perfil tubo com aço SAE 1018 CD e alteração da junta para o mesmo material, limite de escoamento de 370 MPa. Nas Figuras 47 e 48 são mostrados os resultados das tensões de Von Mises obtidas no FEA.

Figura 47: Resultado do FEA - Aço SAE 1018 CD – Via de engate.

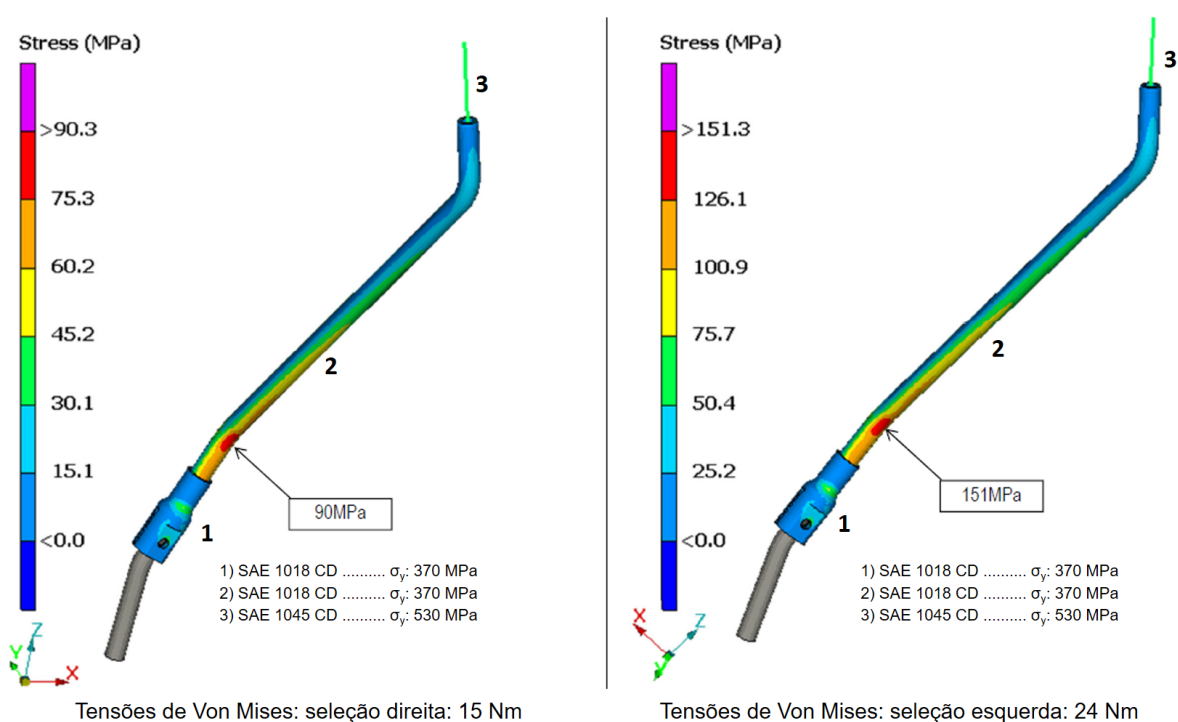
Tensões de Von Mises na alavanca de marchas – Via de engate (coordenada Y).



Fonte: Autor (2022).

Figura 48: Resultado do FEA - Aço SAE 1018 CD – Seleção.

Tensões de Von Mises na alavanca de marchas – Via de seleção (coordenada X).



Fonte: Autor (2022).

Na tabela 7, temos o critério de aprovação projeto (C.P) e as tensões de Von Mises encontradas na proposta de design 1 com o aço, onde foi aprovada.

Tabela 7: Critério de aprovação (C.P) - Aço SAE 1018 CD – Design 1.

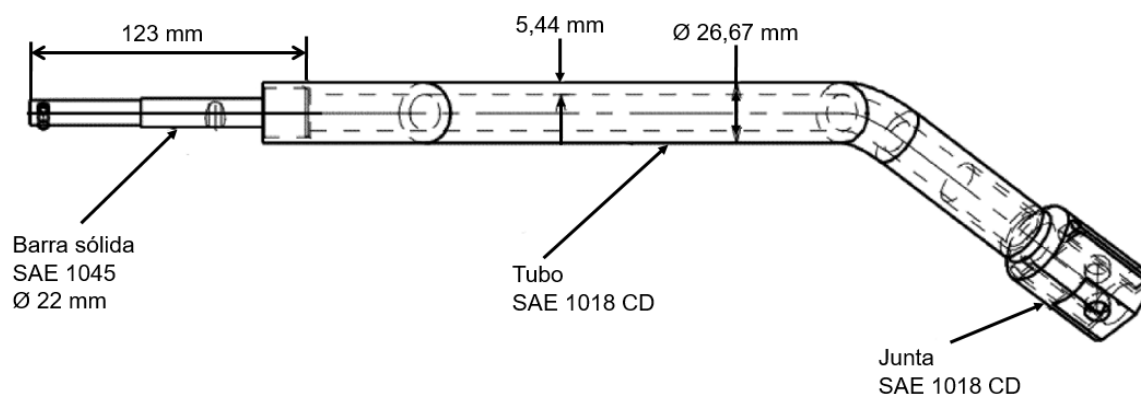
FEA aço SAE 1018 CD - Design 1 - Aprovada						
Seção	σ_y	posição engate		posição seleção		Critério de projeto
		frente	trás	esquerda	direita	
1- Junta	370 MPa	1,3	1,4	4,2	6,9	C.P > 1
2- Tubo	370 MPa	1,2	1,3	2,4	4,1	
3- Barra final	530 MPa	2,1	2,3	6,4	8,1	

Fonte: Autor (2022).

Na Figura 49 é mostrada a alavanca com design final, composta por tubo aço com diâmetro de 26,67 mm e espessura da parede de 5,44 mm e uma junta usinada

de aço, ambos SAE 1018 CD e uma barra de aço SAE 1045 diâmetro de 22 mm, com massa total de 2080 g.

Figura 49: Design final com materiais aprovados no FEA.



Fonte: Autor (2022).

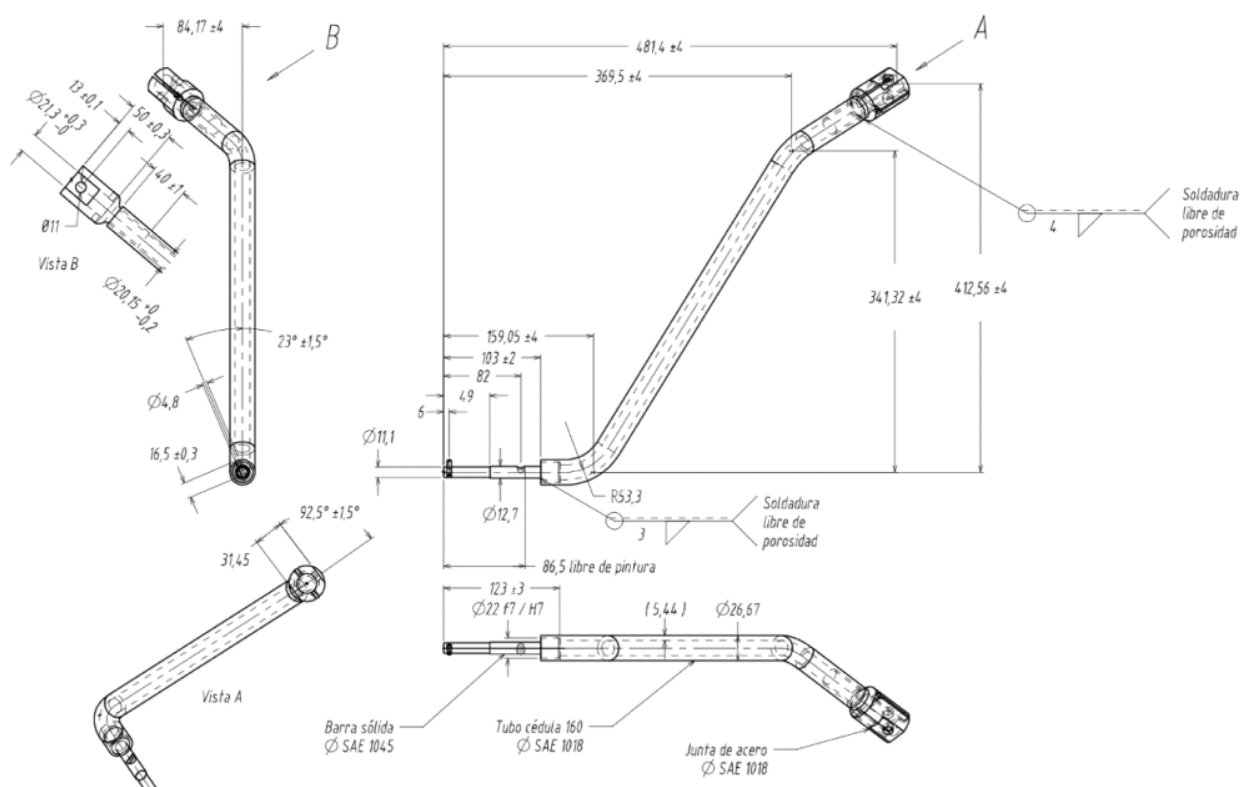
4.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

A fabricação do componente teve duas curvaturas na seção tubular, sendo dobradas com processo do tipo à frio, e duas juntas usinadas conforme desenho fornecido, sendo cada uma delas unidas pelo processo de soldagem MAG.

4.3.1 Confeção do protótipo

Após as etapas de projeto concluídas, o desenho da alavanca foi enviado para o fornecedor mexicano, contendo todas as informações para confecção do primeiro protótipo para validação, Figura 50.

Figura 50: Resultado para confecção do primeiro protótipo da alavanca.



Fonte: Autor (2022).

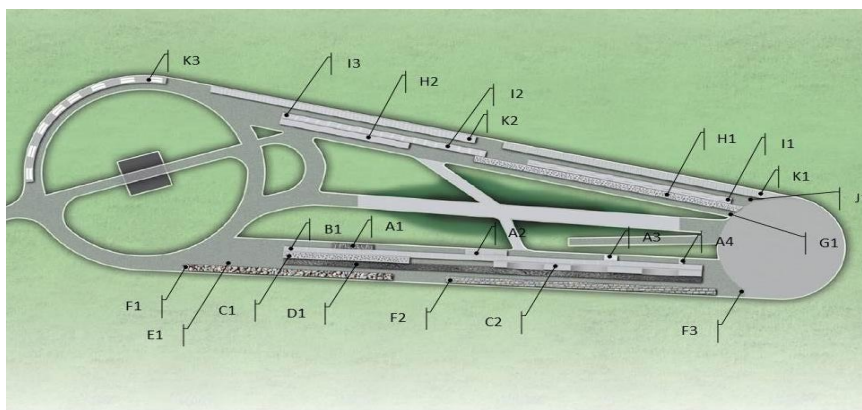
Com o protótipo fabricado, o componente foi enviado para o Brasil para certificação.

4.4 CERTIFICAÇÃO DA ALAVANCA

Nessa etapa, o produto passou por testes no campo de provas da montadora, Figura 51, com totalização de 4.000 ciclos que simula diversas condições de pavimentação como exemplo: paralelepípedos, passagem de nível, buracos, cabeceiras de pontes etc. Foi realizada também rodagem em condições reais, em circuitos com rotas mistas, urbanas e rodoviárias, contemplando diferentes tipos de pavimentação e, essas condições reais foram fundamentais, já que em circuito urbano o índice de trocas de marchas por quilômetro percorrido é muito maior que uma rota rodoviária, a temperatura dos sistemas de interface com o componente em testes é agressiva, assim como topografia típica urbana com aclives acentuados. Na

Figura 52 é observada a rota de certificação em condição real de trabalho, fazendo as correlações com a análise clássica de fadiga, chegou-se ao total de 90.000km de vida desse componente

Figura 51: Campo de provas da montadora.



Fonte: Autor (2022).

Figura 52: Circuito de rodagem.



Fonte: Autor (2022).

4.5 CARACTERIZAÇÃO DA ALAVANCA

4.5.1 Ensaios não destrutivos

Ao observar-se uma trinca superficial, característica de fadiga com descontinuidade aparente, optou-se por realizar ensaio de Líquido Penetrante, assim revelar a capilaridade e descontinuidades abertas na superfície.

PM (partículas magnéticas) - descontinuidades subsuperficiais

US (ultrassom) - descontinuidades internas

Foram realizados ensaios de líquido penetrante em dois protótipos de alavanca como etapa da validação, sendo o procedimento de inspeção visual de trincas. Os produtos e equipamentos necessários para execução desse procedimento, são:

- Equipamentos de Proteção Individual – EPI’S, óculos e sapatos de segurança, máscara pra vias aéreas, luvas;

- Produtos para aplicação na superfície a ser analisada: removedor E59, líquido penetrante VP-30 e revelador D-70.

- As etapas desse procedimento consistem nas seguintes ações:
- Limpar e secar as peças que serão analisadas no ensaio de líquido penetrante com removedor E-59, as peças precisam estar limpas de impurezas como terra, óleos, sujidades em geral;
- Aplicar o líquido penetrante VP-30 e aguardar no mínimo de 5 minutos e no máximo 1 hora para melhor reação;
- Remover o líquido penetrante somente com água e secar as peças, e para as peças que não podem ser removidas, utilizar o borrifador de água colocando papel embaixo;
- Aplicar revelador D-70 com uma leve e fina camada do produto, sendo que o mecânico deve observar se existem rachaduras em vermelho na peça e avaliar se contém ou não trinca, no prazo de 30 minutos, após este tempo não tem validade na aplicação.

4.5.2 Ensaio destrutivos

Foram realizados no laboratório de materiais da montadora, os ensaios destrutivos em dois dos quatro protótipos.

4.5.3 Ensaio de dureza Brinell

Foi realizado o ensaio de dureza no equipamento Durômetro Instron Wolpert, Figura 53, com uma esfera para fazer a indentação de 2,5 mm no corpo de prova da barra com aplicação de força de 187,5 kgf.

Figura 53: Durômetro Instron Wolpert.



Fonte: Autor (2022).

4.5.4 Análise Macroscópica

A análise foi realizada na superfície da fratura na região da solda da flange com a barra com Estereoscópio Olympus modelo SZ61, Figura 54.

Figura 54: Estereoscópio Olympus SZ61.



Fonte: Autor (2022).

4.5.5 Análise Microscópica

Foram utilizadas lixas de Carbetto de Silício com granulometria em mesh 80, 120, 400, 600 e 1200. Após lixamento, foram polidas com alumina 3 microns e atacadas com Nital 3%, com objetivo de observar e caracterizar sua microestrutura.

A análise foi realizada em três corpos de prova, utilizando Microscópio óptico Olympus BX61, Figura 55 e o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo ZEISS EVO 10 MA, Figura 56, acoplado com EDS Oxford Instruments X-act.

Figura 55: Microscópio Óptico Olympus BX61.



Fonte: Autor (2022).

Figura 56: Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss EVO 10 MA.



Fonte: Autor (2022).

4.5.6 Ensaio de Microdureza Vickers

O ensaio foi realizado na região da solda no Microdurômetro Shimadzu LG-PS2-5, Figura 57, sendo em três pontos: cordão de solda, metal base e ZTA. Foi aplicado uma força de 9,807 N em um intervalo de tempo de 15 segundos.

Figura 57: Microdurômetro Shimadzu LG PS2-5



Fonte: Autor (2022).

5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões serão apresentados de acordo com os protótipos confeccionados após a FEA e durante os testes de validação no veículo.

5.1 Protótipo 1

A alavanca recebida do fornecedor Mexicano foi submetida aos testes de validação no campo de provas da montadora, e, com 893 ciclos de testes, equivalente a 20.000 km, ocorreu a quebra de um subcomponente do interior da transmissão, conhecida como Finger de Engate, Figura 58.

Figura 58: Finger da transmissão fraturado com 893 ciclos.



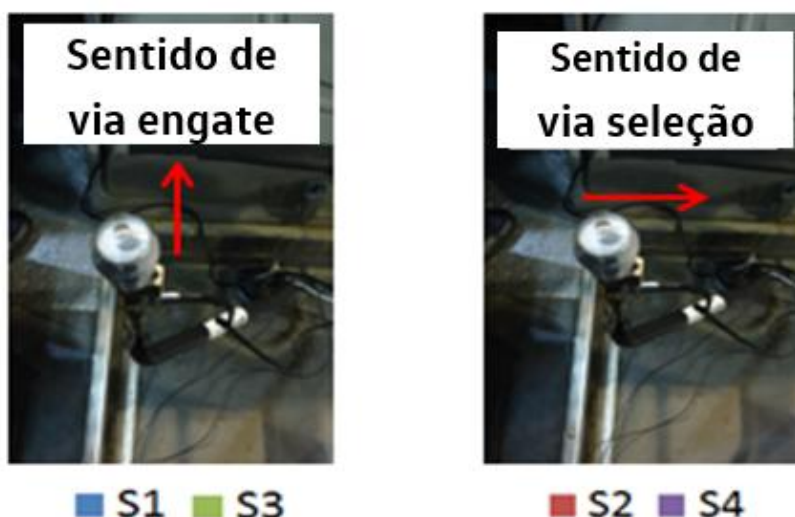
Fonte: Autor (2022).

5.1.1 Extensometria

Com base na peça falhada, as tensões responsáveis pela nucleação da trinca são ortogonais à direção de propagação da trinca, com isso um dos pontos para fixação do extensômetro já foi definido.

No total, foi realizada instrumentação com 6 extensômetros, sendo 4 pontos de medições na posição do manípulo de marchas, S1, S2, S3 e S4, Figura 59, e 2 pontos na peça que falhou, S5 e S6, Figura 60, para verificar as tensões mecânicas no ponto que estava ocorrendo a falha.

Figura 59: Extensômetros na alavanca de engate.



Fonte: Autor (2022).

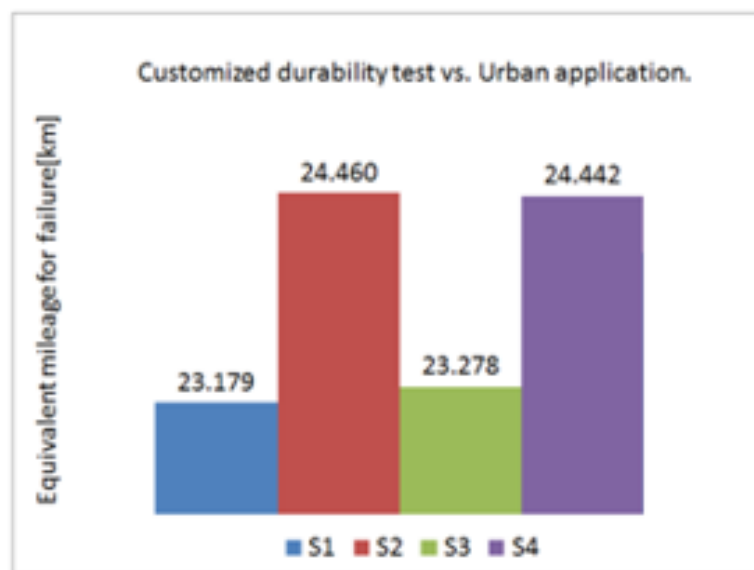
Figura 60: Extensômetros no finger da transmissão.



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 61 é mostrada a equivalência dos carregamentos encontrados na alavanca com a massa do protótipo 1, de 2080 g versus a vida útil que esse componente seria submetido, e teria falha aos 23.000 km em uma aplicação de rodagem urbana.

Figura 61: Massa da alavanca de engate de marchas protótipo.



Fonte: Autor (2022).

Como resultado da instrumentação, observado em vermelho na Figura 62, temos os carregamentos obtidos com o extensômetro S6 no finger da transmissão, onde cada ponto é uma força acima do limite de fadiga do material fazendo com que tenha uma vida útil reduzida significativamente, que foi o ocorrido anteriormente.

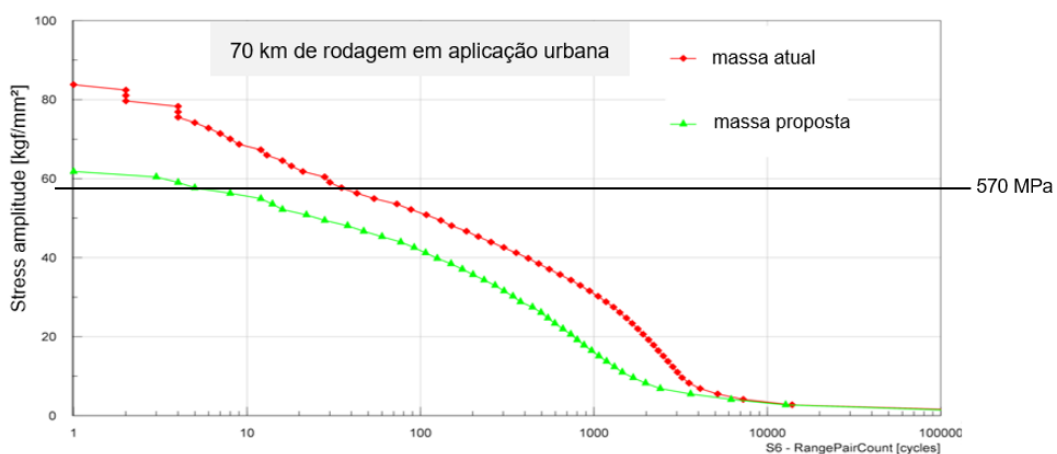
Esses carregamentos são na posição de seleção da via de marchas para esquerda e direita e nesse extensômetro S6, temos amplitudes de tensão mecânicas acima do limite de fadiga do material de 570 Mpa, sendo a massa maior de 2080 g resultando uma tensão de fadiga de 820 MPa.

Após essa análise com os extensômetros, foi atribuída à massa da alavanca protótipo 1 como causa raiz desse problema apresentado, com o conceito de momento fletor onde a massa e a distância têm influência direta nas tensões naquele ponto onde ocorreu a falha. A massa de 2080 g contribui pela transferência

de toda vibração da alavanca de engate ao finger da transmissão, necessitando de uma alavanca mais leve.

Figura 62: Gráfico das aquisições dos carregamentos no finger da transmissão

Extensômetro S6 – sentido da via de seleção.



Fonte: Autor (2022).

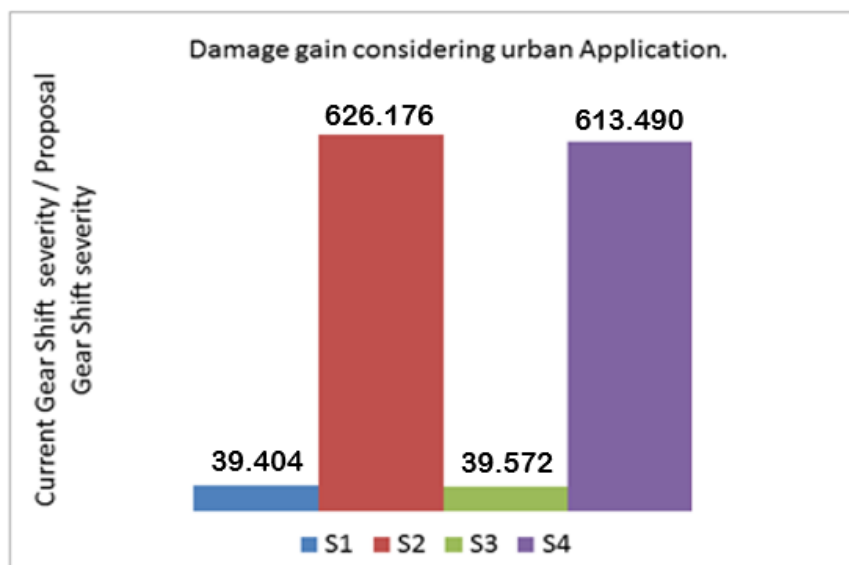
5.2 Protótipo 2

Com intuito de confirmar o conceito do momento fletor em relação a massa, foi construído um protótipo com material disponível no almoxarifado, onde obteve-se uma alavanca com massa total de 675 g, Figura 63.

Figura 63: Alavanca com baixa massa

Fonte: Autor (2022).

Na Figura 64, é mostrada o ganho de vida útil que a alavanca de marchas teve com a redução de massa, sendo de 25 vezes na direção onde ocorreu a falha no finger da transmissão, ou seja, acima dos 600.000 km.

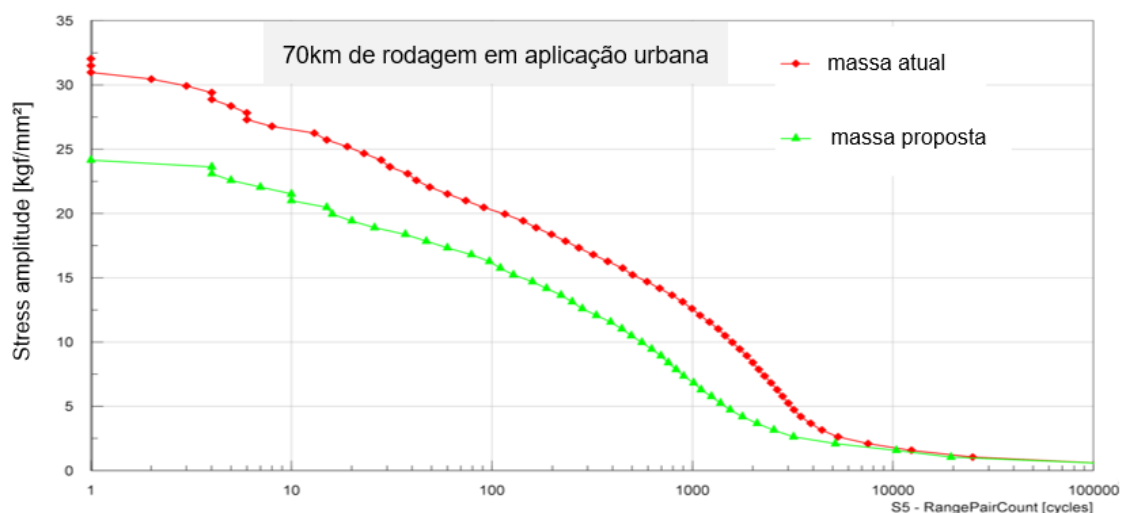
Figura 64: massa de 675 g.

Fonte: Autor (2022).

Com base nos estudos, os extensômetros S2 e S4 são referentes aos movimentos da alavanca do sentido da seleção de marchas para esquerda e direita, dessa forma foi verificado uma redução de 95% das tensões no finger com a alavanca de menor massa, validando o conceito estabelecido.

A Figura 65 mostra os carregamentos obtidos em uma rodagem de 70km em circuito urbano com os extensômetro S5 no finger da transmissão, sendo onde é medido o carregamento na posição de engate de marchas para frente e pra trás. Nesse extensômetro S5, temos as amplitudes de tensão mecânicas bem abaixo do limite de fadiga do material de 570 MPa, em ambas as massas da alavanca.

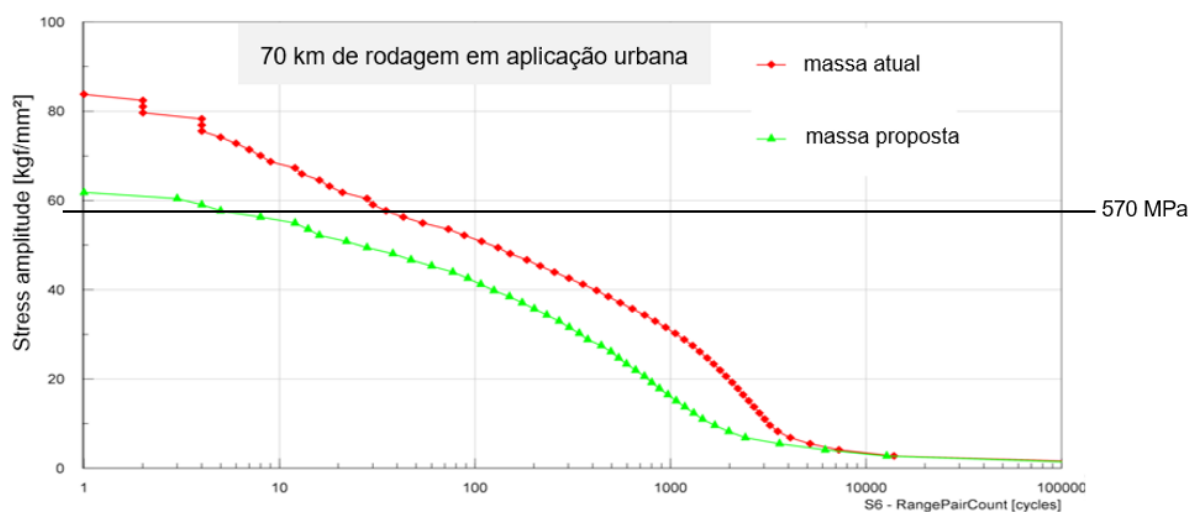
Figura 65: Gráfico das aquisições dos carregamentos no finger da transmissão
Extensômetro S5 – sentido da via de engate.



Fonte: Autor (2022).

Com a mesma instrumentação para obtenção dos carregamentos com a alavanca protótipo 1, agora aplicando a alavanca com a massa de 675 g (massa proposta), Figura 67, é mostrada a redução das amplitudes das tensões mecânicas para abaixo do limite de fadiga do material, o que nos proporciona uma vida infinita do componente.

Figura 66: Gráfico das aquisições dos carregamentos no finger da transmissão Extensômetro S6 – sentido da via de seleção.

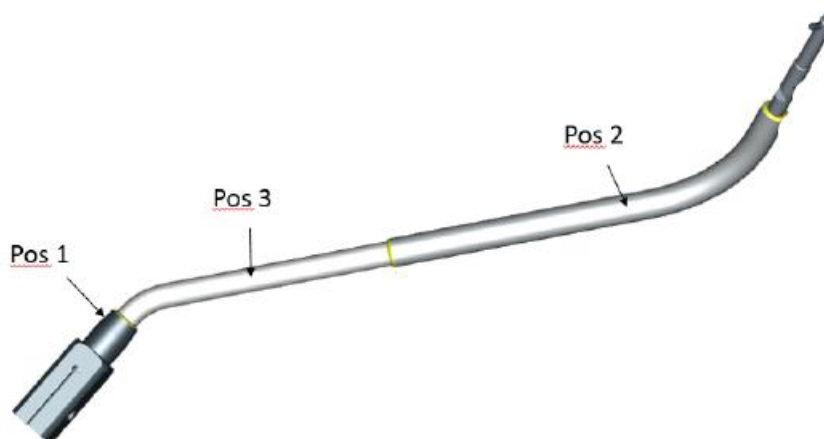


Fonte: Autor (2022).

5.3 Protótipo 3

Levando em consideração a necessidade de reduzir a massa da alavanca de marchas devido quebras nos subsistemas, e ainda havendo o risco de quebra no ponto de maior concentração de tensão, caso seja utilizado um tubo de aço com espessura baixa em toda peça, o fornecedor propôs um novo design de alavanca dividido em 3 seções, soldadas por processo MAG sob norma VW 01106-1, sendo todas em aço SAE 1018, conforme Figura 67.

Figura 67: Proposta alavanca com menor massa.



Fonte: Autor (2022).

Onde:

Luva de acoplamento;

Tubo de aço $\varnothing 20,7 \times 1,5$ mm;

Barra de aço $\varnothing 17,4$ mm.

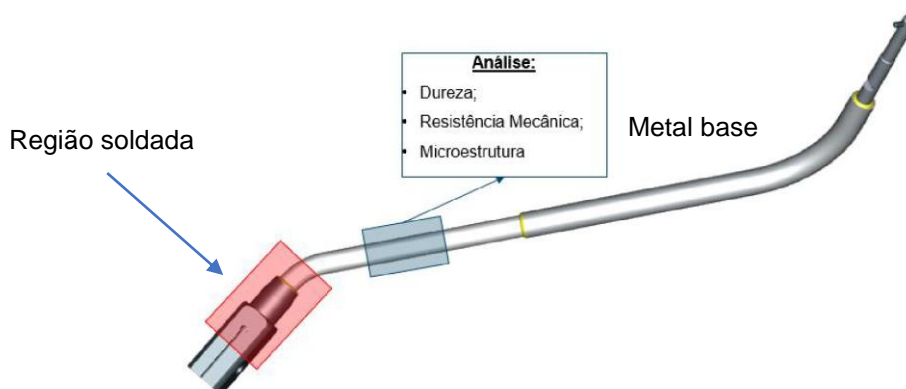
Após a fabricação desse novo protótipo, foi realizada a montagem no mesmo veículo da primeira amostra para nova rodagem de certificação, com previsão de rodagem de 4.000 ciclos. Durante o exame, não foram apresentadas falhas no finger da transmissão, no entanto, ao atingir 3.880 ciclos ocorreu uma falha no engate da alavanca provocando a quebra da mesma.

5.3.1 Ensaio Mecânicos

Foi observado que a falha ocorreu próximo a região soldada, indicando uma possível trinca na solda. Para chegar à causa raiz, foi feita a caracterização da barra de aço, nos laboratórios de materiais da montadora, por meio de ensaios mecânicos, metalografia, análise da superfície da fratura e da região falhada.

Na Figura 68, é mostrada as regiões que foram retiradas amostras para os ensaios de caracterização. Vale ressaltar que a região em vermelha foi a que apresentou a falha.

Figura 68: Esquema da região amostrada da alavanca de engate para caracterização.



Fonte: Autor (2022).

Com o auxílio do durômetro Instron Wolpert, foi realizado o ensaio de dureza Brinell, apresentando resultados acima da faixa especificada para o material SAE 1018 conforme norma SAE J 1397-92, Tabela 8. Isso pode ser decorrente da quantidade de perlita que tem propriedades que aumentam a dureza do material.

Tabela 8: Resultado do ensaio de dureza.

Dureza Brinell (HB)		
Amostra	Especificado (mín)	Encontrado
Metal base	126	186

Fonte: Autor (2022).

Com o auxílio do Microdurômetro Shimadzu LG-PS2-5, foi realizado o ensaio de dureza Vickers em três pontos: cordão de solda, metal base e ZTA. Foi aplicado uma força de 9,807 N em um intervalo de tempo de 15 segundos, Tabela 9.

Tabela 9: Resultado do ensaio de microdureza.

Microdureza Vickers (HV)			
Região	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Cordão de solda	331	325	322
ZTA	238	233	240
Metal base	199	197	201

Fonte: Autor (2022).

5.3.2 Ensaio Metalográfico

Após o ensaio de dureza, a amostra foi submetida a metalografia por meio do Microscópio Óptico Olympus BX61. Para isso, o metal base sofreu ataque químico com nital 3%, sendo observado no aumento 100x uma microestrutura equiaxial homogênea composta de uma matriz ferrítica e baixa fração volumétrica de perlita, Figura 70. Essa análise visual, realizada por meio de observação direta da microestrutura da amostra, permite identificar características como a forma e distribuição dos grãos (equiaxiais e homogêneos), as fases presentes (ferrita e perlita) e a proporção relativa entre as fases (baixa fração de perlita).

Figura 69: Microestrutura do metal base – Ataque nital 3%. Aumento 100X.

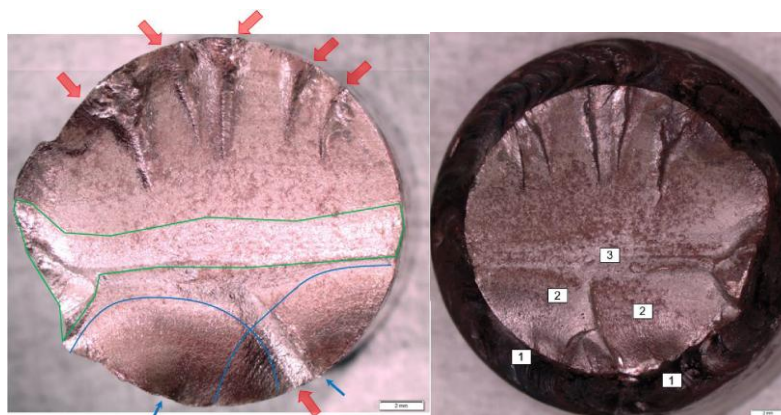


Fonte: Autor (2022).

5.3.3 Análise macroscópica da falha

A análise macroscópica foi realizada na superfície de fratura. Com isso, foi possível observar diversos pontos de nucleação da trinca, como mostrado na Figura 70, e foi possível identificar duas frentes bem características de nucleação de trinca por fadiga (apontadas pelas setas em azul). As linhas em azul indicam as marcas de praia, indício de fratura por fadiga. Já em verde foi delimitado a região de fratura final por sobrecarga. Nota-se, que neste caso a fratura final ocorreu no centro da peça.

Figura 70: Regiões da fratura.



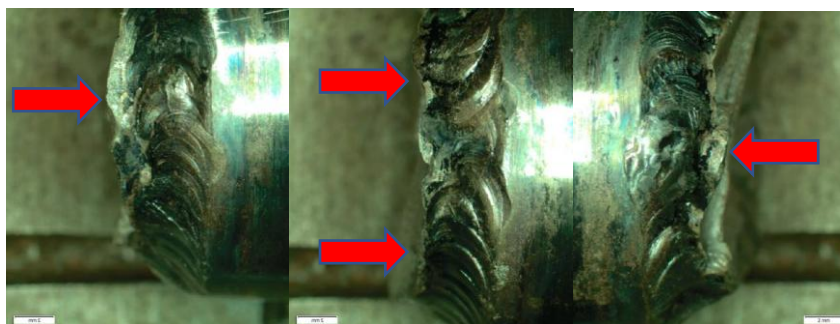
- (1) Nucleação da trinca; (2) Crescimento estável da trinca;
(3) Fratura final.

Fonte: Autor (2022).

Após a retirada da tinta que recobria a solda, verificou-se um cordão de solda com defeitos superficiais, como porosidades e má formação da poça de fusão, mostrando uma solda mal executada. Além disso, nota-se que a fratura ocorre em sua maior parte na barra em região próxima da solda como mostra as setas em vermelho, Figura 71.

Acredita-se que as nucleações desses pontos aconteceram de forma simultânea, pois é possível identificar na fratura as marcas de catraca indicadas. De acordo com Campanharo (2018), essas marcas de catraca são características de fratura por fadiga.

Figura 71: Região da solda com fratura.

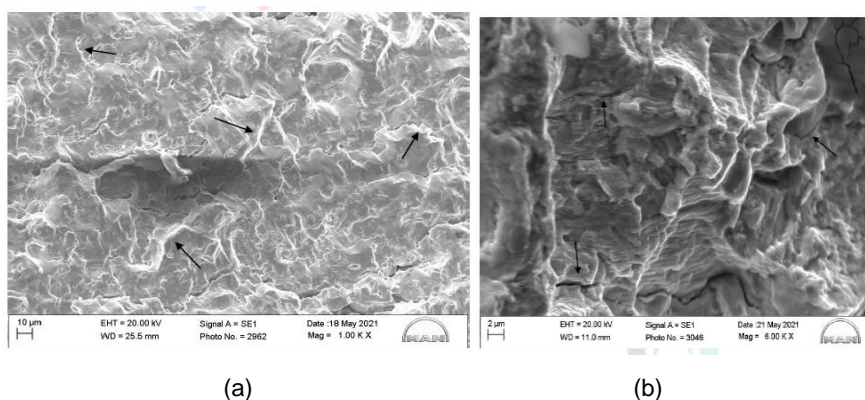


Fonte: Autor (2022).

5.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As fractografias (a) e (b), mostradas na Figura 73, apontam a região de aspecto amassado com presença de linhas de formação na superfície de fratura (setas pretas) e região de crescimento estável da trinca: estrias de fadiga bem definidas e trincas secundárias (setas pretas), respectivamente, características de materiais que sofreram carregamentos cíclicos (Miranda, 2021).

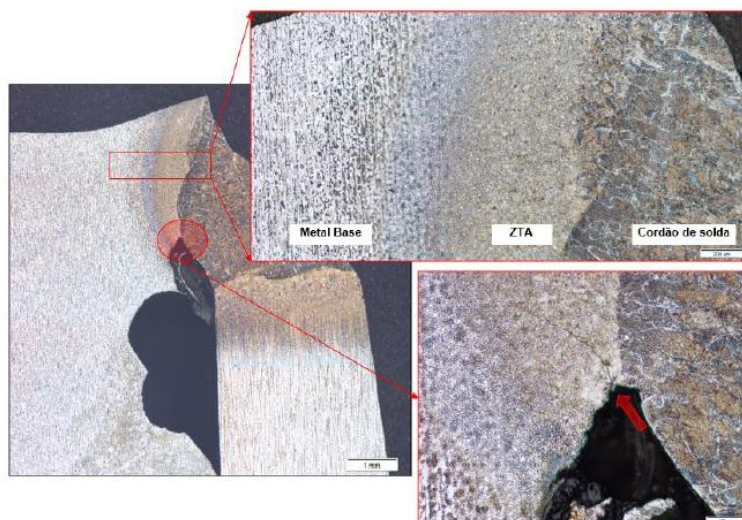
Figura 72: Fractografias da superfície de fratura obtidas no MEV.



Fonte: Autor (2022).

Já a Figura 73 mostra a região da solda onde é possível observar na seta vermelha a formação de uma trinca na região interna da barra, que cresce na direção do metal base.

Figura 73: Micrografia da região da junta soldada.



Fonte: Autor (2022).

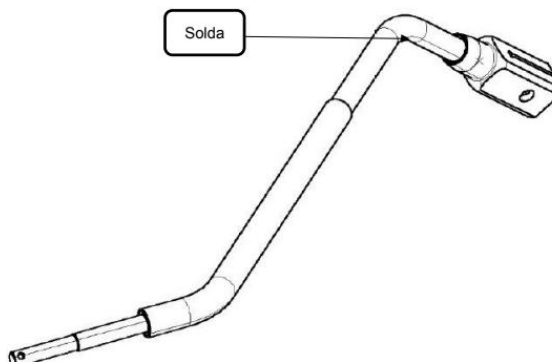
5.4 Protótipo 4

Após a identificação da nucleação da trinca no cordão de solda, foi produzida uma nova peça do mesmo fornecedor, no entanto com uma melhor execução da solda. O teste foi reproduzido no mesmo veículo no campo de provas, obtendo como resultado a finalização de 4.452 ciclos, sendo que cada ciclo são 4 voltas no campo de provas e, cada volta, o veículo passa em obstáculos simulando as diversas condições reais de pavimentação. Esses ciclos, foram equivalentes a 445.000 km, correspondendo a 111% do total sugerido, obtendo êxito no processo de certificação.

5.4.1 Caracterização Da Alavanca

O protótipo 4 utilizada na rodagem de certificação sem ocorrência de falhas foi submetida a caracterização com análise da solda, dureza, resistência mecânica e microestrutura da barra da alavanca de mudança, Figura 75.

Figura 74: Peça final avaliada.



Fonte: Acervo do autor (2023)

Na Figura 76, é apresentada a análise da microestrutura composta por ferrita e ilhas de perlita, atacada com Nital 3% e aumento de 100X.

Figura 75: Microestrutura do metal base da peça final –
Ataque nital 3%. Aumento 100X.



Fonte: Autor (2023).

Na tabela 10, utilizando durômetro Instron Wolpert, foi realizado o ensaio de dureza Brinell, apresentando resultados acima da faixa especificada para o material SAE 1018 conforme norma SAE J 1397-92.

Tabela 10: Resultado do ensaio de dureza.

Dureza Brinell (HB)		
Amostra	Especificado (mín)	Encontrado
1018 CD	126	199

Fonte: Autor (2023).

O resultado do ensaio de dureza Brinell acima da faixa especificada para o SAE 1018, conforme a norma SAE J1397-92, indica que o material pode ter sofrido alguma alteração em sua condição original, como:

- Tratamento térmico não especificado (como têmpera ou revenimento).
- Trabalho a frio (deformação plástica que aumenta a dureza).
- Contaminação ou mistura com outro aço de maior teor de carbono.
- Erro na identificação do material (não é realmente SAE 1018).
- Presença de microconstituintes duros não esperados (como martensita ou bainita).

A norma SAE J1397-92 é um relatório informativo da Society of Automotive Engineers (SAE) que fornece estimativas de propriedades mecânicas e características de usinabilidade para diversos graus de aço.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma investigação detalhada sobre a sistematização do processo de desenvolvimento e fabricação do braço de alavanca para ônibus com 15 toneladas de Peso Bruto Total (PBT). A abordagem adotada contemplou desde a concepção inicial até a certificação do produto final, com foco em aspectos críticos como design, testes, análise de falhas e integração entre áreas envolvidas.

A aplicação de ferramentas de simulação computacional foi essencial para a definição do design mais eficiente e para a seleção adequada dos materiais. O design 1, desenvolvido com aço SAE 1018 CD em perfis tubular e barra, foi validado por meio de testes de certificação, atingindo 4.452 ciclos sem ocorrência de falhas. A análise de elementos finitos (FEA) forneceu subsídios importantes sobre o comportamento estrutural do componente, permitindo a identificação de áreas de melhoria e a proposição de ajustes no design e no material.

Além disso, foram realizadas análises de falha detalhadas, que contribuíram para a compreensão das causas potenciais de problemas e para o desenvolvimento de soluções preventivas. A avaliação do impacto de alterações no design e no material revelou oportunidades significativas de otimização, resultando em ganhos de eficiência, resistência e segurança.

Atualmente, o conceito validado encontra-se em produção seriada na planta do México, com mais de 20.000 veículos fabricados sem registros de falhas relacionadas à alavanca. Esse resultado reforça a eficácia do processo de desenvolvimento adotado, bem como a robustez da solução implementada.

Por fim, foi realizada uma avaliação crítica da eficácia do processo de certificação, identificando pontos fortes e oportunidades de aprimoramento, com o objetivo de garantir a conformidade e a qualidade do produto final. A integração eficiente entre as etapas de concepção, desenvolvimento, testes e certificação mostrou-se fundamental para o sucesso do projeto e para a confiabilidade do componente em aplicação real.

REFERÊNCIAS

ANTP. **Acessibilidade nos transportes**, vol 4, 2016.

Branco, C. A. G. M. **Mecânica dos Materiais**. [S. I.]: LOCAL: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.

Borguesani, A. R. *et al.* Perfil Antropométrico dos Caminhoneiros Brasileiros. **Revista Ação Ergonômica**, v. 14, n. 1, p. 112-120, 2022.

Cardoso, J. C. S. Estudo das melhores práticas sobre a vantagem tecnológica da transmissão automática de veículos de passeio com relação ao consumo de combustível. **Dissertação**. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, 2012.

Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. John Wiley & Sons. 2018.

Cortez, Henrique. **Transporte coletivo é mais sustentável que o individual**, 2023.

Costa, W. Metodologia para conversão de veículos equipados com motores a combustão interna para tração elétrica: aplicação de motor síncrono de ímã permanente com fluxo magnético radial a um furgão. **Dissertação de Mestrado**. Faculdade de Engenharia. Centro de Tecnologia e Ciência. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

DASSAUT SYSTEMS. ABAQUS CAE2024. **Site**. Disponível em: <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus/cae> Acesso em: 20/08/2024.

Dieter, G. E., & Bacon, D. L. **Mechanical Metallurgy**. McGraw-Hill Education, 2012.

ESAB, Apostila de Soldagem MIG/MA. Welding Handbook Eighth edition, 2005.

Faria, R. N. **Materials Selection and Mechanical Design**. Marcel Dekker, 2001.

Faias, S. M. R. **Optimização de Sistemas de Propulsão de Veículos para Frotas**. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.

Figueiredo, K. M. **Tecnologia da Soldagem. Centro de educação do Maranhão**. Centro de Mecânica e Materiais, São Luis do Maranhão, 2005.

Fogagnolo, J. B. **Introdução à Processos e Metalurgia da Soldagem**. Apostila UNICAMP, 2011.

Gomes, L. M. M. **O Veículo Eléctrico e a sua Integração no Sistema Eléctrico**. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

Heywood, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2018.

Infosolda. Processo mig/mag – Modos de transferência. **Site**. Disponível em: <https://infosolda.com.br/175-processo-mig-mag-modos-de-transferencias/>. Acesso em: 08/11/2024.

Marino, A. L. **Comparação entre os Processos de Soldagem MIG/MAG Eletrodo Maciço e Alma Metálica**. Universidade Luterana Do Brasil. Canoas, 2010.

Modenesi, P.; Marques, P. V. **Introdução ao Processo de Soldagem**. Belo Horizonte, 2000.

Modenesi, P. J. **Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldas**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001.

Nishikawa, K., Murakoshi, J., Matsuki, T. Study on the fatigue of steel highway bridges in Japan. **Construction and Building Materials**, v. 12, p. 133-141, 1998.

Naunheimer, H.; Bertsche, B. Ryborz, J.; Novak, W. **Automotive Transmissions: Fundamentals**, Selection, Desing and Application. 2. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

Ramsis – Simulação de Manequim e Ergonomia 3D. **Site Humansolutions**. Disponível em: <<https://www.humaneticsgroup.com/products/ramsis/ramsis-automotive>>. Acesso em: 10/08/2023.

Raghavan, V. **Failure Analysis of Engineering Materials**. Springer, 2017.

Rajkumar, R.; Lee, I.; Urmson, C.; Dolan, J. **Driving into the Future: A Comprehensive Guide to Autonomous Vehicles**. Springer, 2020.

Solidworks. SolidWorks 2021. Versão 2021. **Software**. Waltham, MA: Dassault Systèmes, 2021.

SAE International. **SAE J826**: Devices for use in defining and measuring vehicle seating accommodation. 2008.

Shames, I. H., Rao, J. M. **Mechanics of Materials**. Prentice Hall, 1999.

Strohaecker, T. R. *et al.* **Fadiga e Análise de Falhas**. Laboratório de Metalurgia Física, LAMEF-UFRGS, 2006.

Sumig. Tipos de gases mais recomendados para o processo de soldagem MIG/MAG na indústria automotiva. **Site**. Disponível em: <https://www.sumig.com/pt/blog/post/tipos-de-gases-mais-recomendados-para-o-processo-de-soldagem-mig-mag-na-industria-automotiva>. Acesso em: 08/11/2024.

Unique Car Parts. Gear Lever Mechanism. **Site**. 2024. Disponível em: https://www.uniquecarsandparts.com.au/how_it_works_gear_lever: Acesso em:

VW Service Self-Study Program. **Volkswagem Service Self-Study Program: 6-speed manual gearbox 02M.** 1998.

Wainer, E. *et al.* **Soldagem Processo e Metalurgia.** 1.Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1995.

Wallner, C. **Vida em Fadiga do Aço ARBL com Estrutura Ferrita-Perlita (Q7).** FEI – Faculdade de engenharia Industrial, 2001.

Wong, J. Y. **Theory of Ground Vehicles.** 4. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2008.