

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Matheus Alves Cunha

**ANÁLISE DE FALHAS EM EXPERIMENTO DE FADIGA TORCIONAL DE EIXO
TRASEIRO DE VEÍCULO A COMBUSTÃO INTERNA**

Betim

2025

MATHEUS ALVES CUNHA

**ANÁLISE DE FALHAS EM EXPERIMENTO DE FADIGA TORCIONAL DE EIXO
TRASEIRO DE VEÍCULO A COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia mecânica Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa

Betim

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

C972a Cunha, Matheus Alves

Análise de falhas em experimento de fadiga torcional de eixo traseiro de veículo a combustão interna / Matheus Alves Cunha. – 2025.

58 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2025.

Orientação: prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa

1. Fadiga. 2. Mecânica automotiva. 3. Veículos a motor.
4. Eixo automotivo. 5. Engenharia Mecânica. I. Cunha, Matheus Alves. II. Título.

CDU: 629.33

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Denísio Pereira Marcos CRB-6/3142

Matheus Alves Cunha


**ANÁLISE DE FALHAS EM EXPERIMENTO DE FADIGA TORCIONAL DE EIXO
TRASEIRO DE VEÍCULO A COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia mecânica.


Aprovado em: 15 / 04 / 2025 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **EVANILTON JOSE ALVES BARBOSA**
Data: 14/05/2025 18:04:17-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof.^(a) Me. Evanilton José Alves Barbosa (Orientador) – IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE FONSECA FELIX**
Data: 06/05/2025 20:11:48-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof.^(a) Dr. André Fonseca Felix (Examinador) – IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL MENDES DE ALMEIDA CARVALHO**
Data: 14/05/2025 12:56:54-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof.^(a) Dr. Gabriel Mendes A. Carvalho (Examinador) – IFMG Campus Betim

Dedico esse trabalho a Deus aos meus pais e meus familiares por todo apoio e carinho durante essa longa jornada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por tudo, pois Deus é base de tudo e sem ele eu sou nada.

Agradeço meus pais, Izequiel de Oliveira Cunha e Lazil Alves Murilo Cunha, por ser minhas referências e apoio.

Agradeço minha noiva, Marianny Cristina Silva Damasceno pelo apoio dado nessa jornada.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Evanilton José Alves Barbosa por todo apoio.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram, mesmo que em forma indireta, para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Para garantir qualidade no funcionamento do automóvel, seus componentes são submetidos a testes em bancadas controladas a fim de identificar falhas dos componentes antes de ser lançado ao público consumidor, tendo total segurança na sua utilização durante toda a vida do veículo, e nesse processo é realizado fadiga do componente para deliberar e qualificar o projeto a fim de aprovar o componente. A fadiga mecânica é um fato abominado na área da engenharia e estabelece uma das principais causas de falhas em componentes mecânicos. Ocorrente devido principalmente a oscilações de tensões ou deformações. Os estudos sobre fadiga em metais tiveram início no século XIX, com o trabalho de August Wohler. Por meio de ensaios com carregamentos cíclicos, o engenheiro buscou compreender as falhas em eixos de vagões ferroviários, introduzindo o tema na área da mecânica. Com o avanço da indústria automotiva, a fadiga também passou a ser um fator crítico em componentes como eixos de veículos, devido às condições severas de uso, como variações de carga e impactos constantes. Este estudo tem como objetivo analisar o caso de falha em eixos automotivos causadas pela fadiga mecânica. Para isso, serão revisados artigos que tratam dos fatores que influenciam o fenômeno e análise de caso, buscando compreender seus mecanismos e os impactos que podem comprometer a segurança e o desempenho de veículos.

Palavras-chave: Eixo traseiro, Experimento em bancada, Fadiga.

ABSTRACT

To ensure the quality of automobile performance, its components are subjected to tests on controlled test benches to identify component failures before being released to consumers, ensuring total safety in their use throughout the vehicle's lifespan. In this process, component fatigue is tested to assess and qualify the design in order to approve the component. Mechanical fatigue is a major concern in the field of engineering and is one of the leading causes of failures in mechanical components. It occurs mainly due to stress or strain fluctuations. Studies on metal fatigue began in the 19th century with the work of August Wohler. Through cyclic loading tests, the engineer sought to understand failures in railway wagon axles, introducing the subject into mechanics. With the advancement of the automotive industry, fatigue has also become a critical factor in components such as vehicle axles due to severe usage conditions, including load variations and constant impacts. This study aims to analyze cases of failure in automotive axles caused by mechanical fatigue. To achieve this, articles addressing the factors influencing the phenomenon and case analyses will be reviewed, seeking to understand its mechanisms and the impacts that may compromise vehicle safety and performance.

Keywords: Rear axle, Bench experiment; Fatigue.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Vista dos componentes de um motor de combustão interna.....	16
Figura 2: Sistema de coordenadas recomendada pela norma ISO 4130 e DIN 70000	17
Figura 3: Esquema da suspensão traseira.....	19
Figura 4: pista com pavimentação ruim 1° parte	23
Figura 5: pista com pavimentação ruim 2° parte	23
Figura 6: pista com calçamento.....	23
Figura 7: Pista de volta de resfriamento	24
Figura 8: Pista com asfalto irregular	24
Figura 9: Aceleração Agressivo e Parada Controlada - Asfalto.....	24
Figura 10: Aceleração Agressivo e Parada Controlada - pavimentação	25
Figura 11: Pista com buracos	25
Figura 12: Pista com ressaltos	25
Figura 13: Quebra-molas brasileiro	26
Figura 14: Estrada de terra.....	26
Figura 15: Estrada de terra.....	27
Figura 16: fixação de strain gauge	27
Figura 17: Fixação de acelerômetro	28
Figura 18: Fixação de strain gauge em mola helicoidal.....	28
Figura 19: Fixação de strain gauge carroceria	29
Figura 20: Fixação de termopar.....	29
Figura 21: Gráfico Tensão x Tempo com amplitude constante e assimétrica	34
Figura 22: Exemplo de carregamento por blocos de amplitude constante	34
Figura 23: Dois tipos de carregamento com amplitude variável: (a) estreita faixa de variação, (b) grande faixa de variação.....	35
Figura 24: Região de uma junta soldada.....	37
Figura 25: Eixo de rolagem em um automóvel de passeio.....	43
Figura 26: Atuador hidráulico MTS	45
Figura 27: Gráfico de onda senoidal defasada a 180°.....	46
Figura 28: Montagem de prova de fadiga torcional do eixo traseiro.	47
Figura 29: Montagem de prova de fadiga torcional do eixo traseiro.	47

Figura 30: Falsa roda.	48
Figura 31: Componentes detalhados do eixo	49
Figura 32: Falha na solda interna do eixo evidenciada em teste de bancada	49
Figura 33: Falha suporte mola evidenciada em teste de bancada	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Frequências naturais de fadiga	43
Tabela 2: Especificações dos componentes utilizados no teste físico.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais
- NBR - Normas Técnicas Brasileiras
- TCC - Trabalho de Conclusão de Curso
- ZTA - Zona termicamente afetada
- SAE - Society of Automotive Engineers
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- DIN - German Institute for Standardization
- RPM - Rotações por minuto
- PVD - Deposição física de vapor
- CVD - Deposição química de vapor
- EF - Elementos finitos
- MBS - Técnicas de dinâmica multicorpos
- UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto
- UFSC - Universidade Federal de São Carlos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Colocação do Problema	14
1.2	Objetivos	14
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	15
2.2	EIXO TRASEIRO	16
2.3	ANALISE DINÂMICA	19
2.4	NORMAS	21
2.5	AQUISIÇÃO DE SINAIS EM PISTA DE PROVA, PARA REALIZAR TESTE EM BANCADA	22
2.6	TRATAMENTO DE SINAL PARA TESTE EM BANCADA.....	26
2.7	PROCESSOS DE FADIGA	30
2.7.1	Processo de Fadiga Torcional.....	30
2.7.2	Mecanismo de fadiga	32
2.7.3	Carregamentos no processo de fadiga.....	33
2.7.4	Carregamento por Bloco.....	34
2.7.5	Carregamento com Amplitude Variável	35
2.8	PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	36
2.8.1	Soldagem	36
2.8.2	Estampagem	38
2.8.2.1	Estampo de corte.....	38
2.8.2.2	Estampo de dobra	39
2.8.2.3	Estampo de repuxo	40
3	METODOLOGIA	41
3.1	PESQUISA EM ARTIGOS.....	41
3.2	TESTES EM BANCADA	45
4	RESULTADO E DISCURSÃO.....	48
4.1	RESULTADO E DISCURSÃO.....	48
4.2	ESTUDO DE CASO FALHA EIXO TRASEIRO DO VEÍCULO DE PASSEIO ...	49
4.2.1	ERRO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	50
4.2.2	ERRO PROCESSO DE CORTE NA ESTAMPAGEM	52
5	CONCLUSÃO	53
6	REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

Nos meados do século XIX, o engenheiro alemão August Wohler deu início aos estudos sobre a fadiga mecânica, motivado pelo grande número de falhas em eixos de vagões ferroviários. Por meio de ensaios com carregamentos cíclicos, ele buscou entender os problemas que estavam ocorrendo.

A fadiga mecânica consiste na redução gradual da capacidade de um componente suportar cargas. Esse processo ocorre devido a alterações estruturais permanentes no material, culminando na ruptura causada pelo crescimento de fissuras internas. O fenômeno manifesta-se quando um material é submetido a tensões e deformações repetitivas de forma cíclica.

Segundo Callister (2002), a fadiga é a principal responsável por falhas em metais, representando cerca de 90% dos casos em componentes mecânicos. De acordo com Rosa (2002), falhas por fadiga correspondem de 50% a 90% do total de falhas observadas.

Diversos acidentes já foram atribuídos à fadiga mecânica, muitos dos quais poderiam ter sido evitados com estudos mais aprofundados e a aplicação desse conhecimento antes do uso dos componentes.

Embora a fadiga possa afetar diversas classes de materiais, este trabalho se concentra em materiais metálicos, com um foco específico no segmento automotivo. O objetivo é analisar falhas causadas pela fadiga mecânica no eixo traseiro de veículos automotivos de passeio.

O projeto de um veículo deve resultar em um produto que ofereça segurança ao usuário, seja confiável ao longo de sua utilização e atenda as expectativas de qualidade esperadas pelo cliente. Cada segmento apresenta necessidades específicas que precisam ser levadas em conta durante o projeto, seja um eixo designados a veículos compactos ou eixos de veículos de porte médio (picape), que compreendem diferenças significativas, como valores de massa, dimensões e carregamentos a que estão sujeitos.

A fadiga mecânica é um fenômeno de grande relevância na engenharia, responsável por uma parcela significativa das falhas em componentes mecânicos,

especialmente aqueles submetidos a tensões cíclicas e condições severas de uso. Em automóveis, os eixos traseiros representam um componente fundamental para a segurança e o desempenho do veículo, sendo diretamente responsável pela transmissão de força e pela sustentação de cargas estáticas e dinâmicas.

Apesar dos avanços tecnológicos, falhas causadas por fadiga continuam a ocorrer, resultando em custos elevados de manutenção, perdas econômicas e, em casos mais graves, riscos à integridade física de usuários. Estudos aprofundados sobre as causas e os mecanismos da fadiga mecânica podem contribuir significativamente para a melhoria dos processos de projeto, fabricação e testes de componentes automotivos, aumentando a durabilidade e a confiabilidade dos veículos.

A escolha deste tema se justifica pela necessidade de ampliar o entendimento acerca das condições que levam ao surgimento de falhas por fadiga em eixos traseiros automotivos. Além disso, a pesquisa busca destacar a importância de aplicar métodos de análise e simulação que possam prever e mitigar esses problemas antes que eles ocorram, contribuindo para a evolução da engenharia automotiva e para a segurança dos consumidores.

Dessa forma, este trabalho propõe-se a analisar os fatores que influenciam o comportamento do eixo traseiro do veículo automotivo de passeio, bem como a explorar estratégias para reduzir a incidência de falhas por fadiga, oferecendo uma contribuição relevante tanto para a academia quanto para a indústria automotiva.

O trabalho foi organizado por capítulos, desenvolvidos para alcançar os objetivos específicos. O capítulo 1 é a introdução, o capítulo 2 revisão da literatura que foi subdividida em 8 tópicos: motor de combustão interna, eixo traseiro, análise dinâmica, normas, aquisição de sinais de prova para realizar teste em bancada, tratamento do sinal, processo de fadiga torcional, deformação cíclica e fadiga, tensão cíclica, carregamento por bloco, carregamento com amplitude variável e processos de fabricação. Depois foi desenvolvido a metodologia, a análise dos resultados e a discussão deles, e por fim, a conclusão.

1.1 Colocação do Problema

A fadiga mecânica é uma das principais causas de falhas em componentes metálicos, especialmente em sistemas automotivos, onde os eixos traseiros desempenham um papel essencial na transmissão de força e no suporte de cargas dinâmicas. Esses componentes estão frequentemente expostos a condições adversas, como variações de carga, impactos repetitivos e tensões cíclicas, fatores que tornam o surgimento de falhas por fadiga um problema recorrente.

Embora existam estudos e normas relacionados ao comportamento de materiais metálicos, falhas ainda ocorrem devido à complexidade do fenômeno da fadiga e às limitações em prever com precisão seu impacto em componentes automotivos. Além disso, essas falhas podem levar a acidentes graves, altos custos de reparo e comprometimento da segurança dos usuários.

Diante desse cenário, surge o seguinte questionamento: Quais são os fatores críticos que contribuem para a ocorrência de falhas por fadiga no eixo traseiro de veículos automotivos e como esses fatores podem ser mitigados para aumentar a durabilidade e a segurança do componente?

1.2 Objetivos

Analisar os fatores que contribuem para o surgimento de falhas por fadiga mecânica em eixos traseiros de veículos automotivos, propondo estratégias para mitigar esses problemas e aumentar a segurança e a durabilidade dos componentes.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Identificar os principais mecanismos e condições que levam à fadiga mecânica em materiais metálicos, com foco nos eixos automotivos.
- Revisar estudos e casos de falhas por fadiga em eixos traseiros para compreender os fatores de influência, como tensões cíclicas, variações de carga e impactos repetitivos.

- Avaliar métodos de análise e testes utilizados para prever e detectar a fadiga em componentes automotivos.
- Propor melhorias em processos de projeto e fabricação que reduzam a ocorrência de falhas por fadiga em eixos traseiros.
- Fornecer subsídios teóricos e práticos que contribuam para a prevenção de falhas mecânicas e a otimização do desempenho de veículos automotivos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

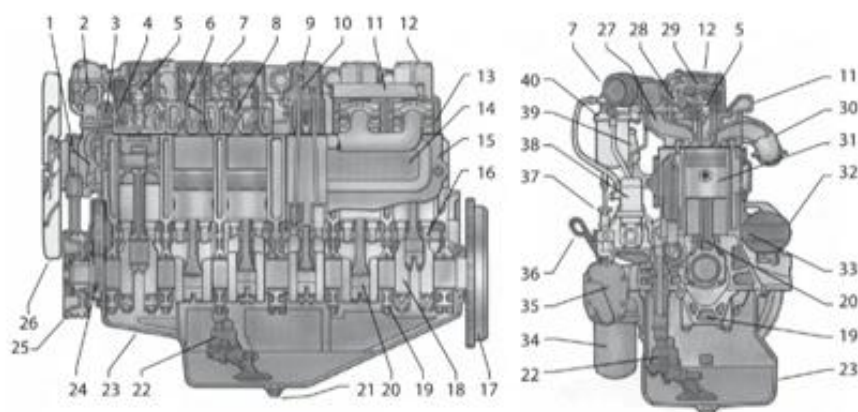
2.1 Motor de combustão interna

Um motor de combustão interna conforme a Figura 1 é uma máquina que converte a energia proveniente da combustão de combustível em energia mecânica, utilizada para gerar movimento. Este tipo de motor é amplamente utilizado em veículos automotores, aeronaves, embarcações e em várias aplicações industriais. Existem basicamente dois tipos principais de motores de combustão interna: motores de ciclo Otto e motores ciclo Diesel.

O motor a gasolina opera com uma mistura de ar e combustível (gasolina ou etanol, por exemplo), que é comprimida e inflamada por uma centelha gerada por uma vela de ignição. Já o motor a diesel comprime apenas ar, e a combustão ocorre quando o combustível diesel é injetado diretamente na câmara de combustão, onde é comprimido pelo ar aquecido pela compressão. Ambos os tipos de motores têm suas próprias vantagens e desvantagens em termos de eficiência, potência e emissões.

Apesar dos avanços em tecnologia de motores elétricos e outras alternativas de propulsão, os motores de combustão interna ainda são amplamente utilizados em muitas aplicações devido à sua familiaridade e densidade de energia. No entanto, há uma crescente pressão para desenvolver tecnologias mais limpas e eficientes para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes associados à queima de combustíveis fósseis. Isso tem levado a avanços em tecnologias híbridas, motores mais eficientes e combustíveis alternativos, visando uma transição para um sistema de transporte mais sustentável.

Figura 1: Vista dos componentes de um motor de combustão interna



1. Bomba d'água	5. Injetor de combustível	9. Linha de combustível
2. Válvula termostática	6. Válvula de escapamento	10. Haste de válvula
3. Compressor de ar	7. Coletor de admissão	11. Duto de água
4. Duto de admissão	8. Válvula de admissão	12. Tampa de válvula
13. Cabeçote	23. Câter	32. Motor de partida
14. Tampa lateral	24. Engrenagem do virabrequim	33. Dreno de água
15. Bloco	25. Amortecedor vibracional	34. Filtro de óleo
16. Eixo comando de válvulas	26. Ventilador	35. Radiador de óleo
17. Volante	27. Duto de admissão	36. Vareta de nível de óleo
18. Virabrequim	28. Balancim da válvula de admissão	37. Bomba manual de combustível
19. Capa de mancal	29. Balancim da válvula de escapamento	38. Bomba injetora de combustível
20. Biela	30. Coletor de escapamento	39. Respiro do câter
21. Bujão do câter	31. Pistão	40. Filtro de combustível
22. Bomba de óleo		

Fonte: Brunetti (2018)

2.2 Eixo traseiro

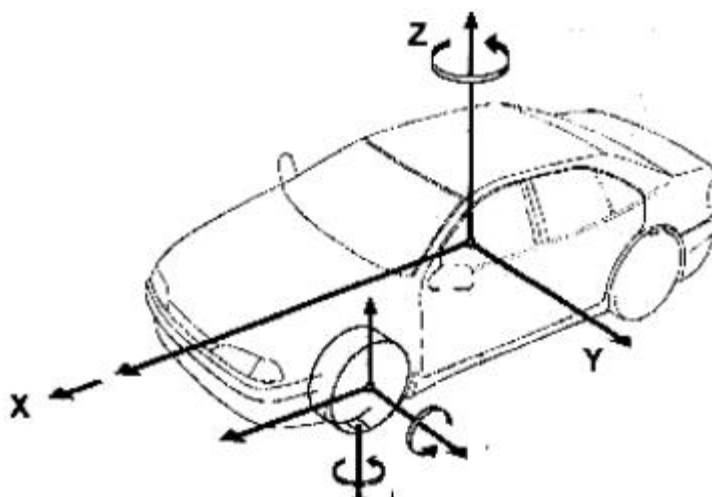
De acordo com Botelho (2018) a dinâmica veicular engloba uma variedade de veículos, não se restringindo apenas a carros de passeio ou de corrida, mas também incluindo veículos pesados como caminhões e ônibus. Ela pode ser dividida em duas partes principais:

- a) Dirigibilidade, que se refere manter o controle do veículo.
- b) Conforto, que diz respeito à sensação percebida pelo motorista e passageiros em relação a vibrações e ruídos transmitidos pelo veículo.

Em termos simples, a dinâmica veicular se refere ao movimento ou deslocamento de um veículo quando sujeito a uma determinada força, que pode ser longitudinal, vertical ou lateral, um exemplo de associação destas forças são, frenagem (longitudinal), buracos e relevos (vertical) e curvas (lateral).

Nessa linha de raciocínio Santos (2008) afirma que a dinâmica no sentido longitudinal estuda os deslocamentos de translatação no eixo x, como pode ser visto na figura 2, como durante frenagens e acelerações. Durante essas situações, o torque das rodas é absorvido em relação ao eixo y, e os eixos do veículo sofrem devido a aclives, declives e distribuição inadequada de carga sobre o implemento.

Figura 2: Sistema de coordenadas recomendada pela norma ISO 4130 e DIN 70000



Fonte: maxwell PUC-Rio 2023

No sentido vertical, a dinâmica analisa os deslocamentos de translatação no eixo z, relacionados à absorção do peso do carregamento sobre os eixos e o chassi do veículo, juntamente com as condições da superfície da estrada. Em relação à rotação em torno do eixo x, são realizadas análises para questões como tombamento do implemento em curvas, carregamento e estabilidade do chassi do veículo.

Já Muller (2017) menciona que a dinâmica no sentido lateral considera as condições resultantes do esterçamento do volante, que causam translatação no eixo y e rotação em z. Em alguns casos, podem ocorrer combinações das diferentes atuações dinâmicas, dependendo do projeto estudado.

Segundo Ângelo (2007) a suspensão de um automóvel pode ser considerada um dos componentes mais importantes em questão de segurança de um veículo. Pois ela é responsável por vários fatores no veículo, como determinar a altura do veículo em relação ao solo, trafegar em terrenos irregulares, como estradas de terra ou com asfalto irregular podendo ultrapassar obstáculos, pela condução do veículo (através dos sistemas de direção e freios) e, principalmente, a suspensão é responsável por

absorver os impactos e irregularidades do piso, fornecendo conforto aos ocupantes do automóvel.

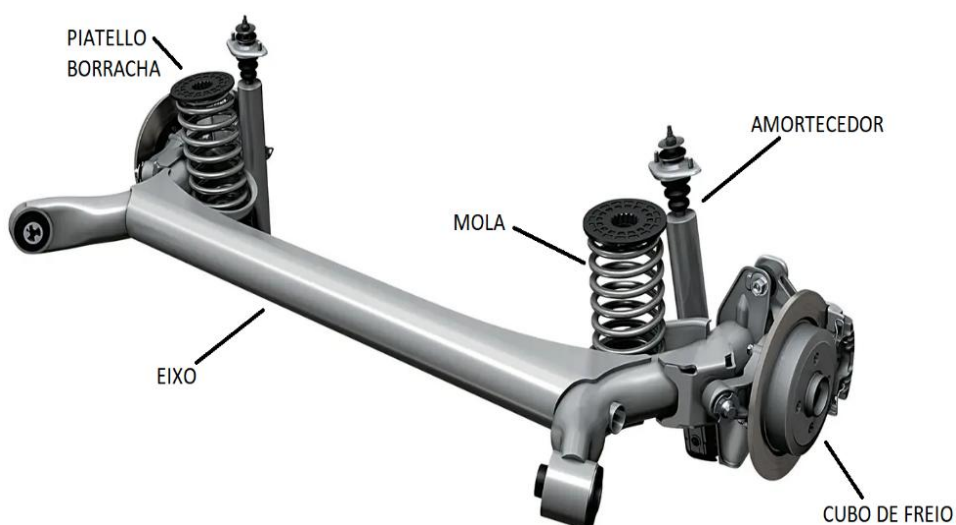
Para Botelho (2018) o fenômeno conhecido como rolagem ou *roll* ocorre quando o veículo está carregado com cargas combinadas. O comportamento desse fenômeno não pode ser considerado o mesmo para veículos pesados e veículos de passeio. Algumas das diferenças incluem a largura e comprimento dos veículos, que alteram significativamente o centro de gravidade e geram condições diferentes para o tombamento. Além disso, a menor distância entre os eixos também reduz o momento torcional sobre o chassi.

O eixo veicular, para Santos (2008) de acordo com a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) 10961, é um conjunto de componentes mecânicos que conectam as rodas opostas de um veículo. Pode incluir um sistema de freios e pneus. É utilizado em diversos tipos de caminhões e geralmente está ligado a um sistema de suspensão, que pode ser mecânico ou pneumático, para suportar uma carroceria. Sua principal função é aumentar a capacidade de carga do veículo para o transporte rodoviário.

Muller (2017) destaca que os primeiros modelos de suspensão usavam molas semielípticas, estas são as molas manufaturadas a partir de tiras de aço que são, em seguida, geralmente reunidas em feixes, devido à sua facilidade de produção, durabilidade e baixo custo. Essas molas eram comuns em veículos, inclusive de passeio, por volta de 1960, especialmente nas suspensões traseiras. Para alinhar os eixos veiculares e manter as molas em posição, as suspensões precisam de braços tensores.

O sistema de suspensão de um veículo pode parecer algo bem simples à primeira vista. Quando se fala em suspensão automotiva, alguns motoristas trazem à cabeça apenas os amortecedores e molas. Mas, na verdade, a suspensão de carro é mais do que isso: ela é composta por muitos componentes e tem influência sobre o comportamento do veículo em diversos aspectos, como pode ser visto na Figura 3.

Angelo (2007), descreve que o eixo traseiro se trata de um corpo metálico, composto por perfis dobrados e soldados, cuja função é interligar as rodas com a carroceria do veículo, através de um sistema de amortecimento. A Figura 3 ilustra o conjunto roda / pneu, juntamente com o sistema de freios e é unido a extremidade do eixo através do cubo de roda.

Figura 3: Esquema da suspensão traseira

Fonte: Quatro Rodas (2016)

Por sua vez, o corpo do eixo é ligado à carroceria do veículo por meio de coxins de borracha (para permitir movimentação relativa e absorção de impactos), formando uma articulação. Os coxins são presos na carroceria através dos seus suportes, que são feitos em chapa estampada e soldados no assoalho do veículo. Para termos a altura correta da suspensão, são utilizadas molas helicoidais, que se apoiam no corpo do eixo e na carroceria. Por último, para permitir o amortecimento de choques e o curso de suspensão são utilizados amortecedores hidráulicos, que são fixados de modo semelhante às molas helicoidais, uma extremidade no eixo, outra na carroceria (ANGELO, 2007).

2.3 Análise dinâmica

A análise dinâmica de veículos de passeio é um campo essencial na engenharia automotiva, pois permite compreender o comportamento dos veículos sob diferentes condições de operação. Essa análise é fundamental para garantir a segurança, o conforto e a eficiência dos automóveis. Segundo WONG (2008), a dinâmica veicular envolve o estudo das forças e movimentos que atuam sobre um veículo em movimento, considerando fatores como aceleração, frenagem e curvas. Um dos principais aspectos da análise dinâmica é a modelagem do veículo, que pode

ser realizada através de simulações computacionais. De acordo com Blundell e HARTY (2004), a utilização de softwares de simulação permite prever o desempenho do veículo em diversas situações, como manobras de emergência e condições adversas de estrada. Essas simulações são cruciais para o desenvolvimento de sistemas de controle, como o controle de estabilidade e tração, que visam melhorar a segurança do veículo.

Além disso, a análise dinâmica também abrange o estudo das suspensões, que desempenham um papel vital no conforto e na estabilidade do veículo. Conforme indicado por GENTA (2009), a suspensão é responsável por absorver as irregularidades da estrada e manter o contato dos pneus com o solo, o que é fundamental para a segurança e o desempenho do veículo. A otimização do sistema de suspensão pode resultar em uma condução mais suave e em uma melhor resposta em situações críticas.

Outro ponto importante a ser considerado é a interação entre o veículo e a estrada. A aderência dos pneus, por exemplo, é um fator determinante na dinâmica do veículo. Segundo PACEJKA (2006), a modelagem da aderência dos pneus permite prever como o veículo se comportará em diferentes superfícies e condições climáticas, o que é essencial para o desenvolvimento de veículos mais seguros e eficientes.

Em conclusão, a análise dinâmica de veículos de passeio é um campo multidisciplinar que envolve a física, a engenharia e a tecnologia da informação. Através de simulações e modelagens, é possível aprimorar o desempenho dos veículos, garantindo maior segurança e conforto para os usuários. A contínua evolução das técnicas de análise dinâmica promete trazer inovações significativas para a indústria automotiva nos próximos anos.

2.4 Normas

A fadiga é um dos principais modos de falha em componentes mecânicos, incluindo eixos veiculares. A análise da resistência à fadiga é crucial para garantir a segurança e a durabilidade dos veículos. Para isso, existem diversas normas que orientam a realização de testes de fadiga em eixos, estabelecendo métodos e critérios que devem ser seguidos.

Uma das normas mais relevantes é a SAE J1095, desenvolvida pela Society of Automotive Engineers (SAE), que fornece diretrizes para a avaliação da resistência à fadiga de componentes automotivos, incluindo eixos (SAE, 2005). Esta norma é amplamente utilizada na indústria automotiva para garantir que os componentes atendam aos requisitos de desempenho e segurança.

Outra norma importante é a ISO 10863, que trata da determinação da resistência à fadiga de componentes mecânicos. Esta norma internacional estabelece métodos de ensaio e critérios de avaliação que são aplicáveis a eixos veiculares, permitindo uma comparação padronizada dos resultados obtidos em diferentes testes (ISO, 1995).

A ASTM E468, da American Society for Testing and Materials (ASTM), também é relevante, pois especifica métodos para a realização de testes de fadiga em materiais e componentes. Essa norma é frequentemente utilizada para avaliar a resistência à fadiga de eixos e outros componentes mecânicos, garantindo que os testes sejam realizados de forma consistente e confiável (ASTM, 2010). Além disso, a norma DIN (German Institute for Standardization) 743, que é uma norma alemã, aborda a resistência à fadiga de eixos e outros componentes rotativos. Ela fornece métodos de cálculo e ensaio que são essenciais para a avaliação da durabilidade dos eixos em condições de operação reais (DIN, 2007).

Essas normas estabelecem procedimentos rigorosos para a realização de testes de fadiga, incluindo a definição de condições de carga, ciclos de teste, métodos de análise e critérios de falha. A conformidade com essas diretrizes é fundamental para garantir a confiabilidade e a segurança dos eixos veiculares, contribuindo para a prevenção de falhas catastróficas durante a operação dos veículos.

2.5 Aquisição de sinais em pista de prova, para realizar teste em bancada

Um dos requisitos necessários para a certificação de um veículo é o teste de rodagem em uma pista controlada, que simula os extremos críticos sob os quais o automóvel estará submetido durante seu uso pelo cliente. Tal pista é composta por trechos retos e com asfalto regular, piso com paralelepípedos, buracos, ondulações e costelas, além de valetas com água. Os obstáculos são dimensionados de forma que, ao atingir uma certa quilometragem de teste, o veículo tenha sido submetido a uma quantidade total de dano acumulado bem superior ao que seria quando utilizado por um cliente, mesmo em condições reconhecidas como adversas, garantindo assim o seu bom funcionamento nas ruas do dia a dia do proprietário do veículo. Os principais obstáculos são descritos a seguir:

- Trecho de corcovas de concreto: este obstáculo simula o uso do curso inteiro de suspensão. As corcovas são de tamanhos variáveis dependendo do tipo de veículo testado (automóvel de passeio ou de transporte de carga);

- Tanque de passagem em lama: utilizado para simular passagem em terrenos enlameados. A profundidade da lama é controlada; eixo amortecedores molas cubos

- Trecho de pista abaulada não-plana: estimula a suspensão do veículo simulando a passagem por terrenos acidentados e com leves abaulamentos. Aqui é alcançada uma das velocidades mais elevadas da pista inteira;

- Trecho de pista abaulada e costeletas: trecho que simula transição entre piso irregular (abaulado) e obstáculo severo (costeletas);

- Trecho de calçamento (paralelepípedo): simula o tráfego sobre paralelepípedos, muito comum nas cidades brasileiras. Aqui ocorre grande excitação de vibração dos componentes;

- Trecho com lombadas: simulação das famosas lombadas (quebra-molas).

Abaixo está ilustrada as pistas descritas.

As Figura de 4 a 14 representam as pistas para aquisição de sinal.

Figura 4: pista com pavimentação ruim 1° parte



Fonte: Quatro Rodas (2016)

Figura 5: pista com pavimentação ruim 2° parte



Fonte: Quatro Rodas (2016)

Figura 6: pista com calçamento



Fonte: Quatro Rodas (2016)

Figura 7: Pista de volta de resfriamento



Fonte: Quatro Rodas (2016)

Figura 8: Pista com asfalto irregular



Fonte: Quatro Rodas (2016)

Figura 9: Aceleração Agressivo e Parada Controlada - Asfalto



Fonte: Quatro Rodas (2016)

Figura 10: Aceleração Agressivo e Parada Controlada - pavimentação



Fonte: Quatro Rodas (2016)

Figura 11: Pista com buracos



Fonte: Quatro Rodas (2016)

Figura 12: Pista com ressaltos



Fonte: Quatro Rodas (2016)

Figura 13: Quebra-molas brasileiro



Fonte: Quatro Rodas (2016)

Figura 14: Estrada de terra



Fonte: Quatro Rodas (2016)

2.6 Tratamento de sinal para teste em bancada

O sinal é um dos principais objetivos para poder obter um ciclo no teste em bancada é fornecer resultados mais rapidamente do que a rodagem verdadeira em pista de teste. Assim, para atingir esta meta, a prova montada em bancada conta com dois fatores preponderantes: a ausência de paradas devido às necessidades dos motoristas e outras eventualidades, e a possibilidade de simular por meio de cálculo de uma amplitude para poder chegar ao dano próximo ou equivalente a vida de um veículo da rodagem real.

O sinal é obtido através da instrumentação de veículos de teste onde são adicionados sensores como por exemplo acelerômetros que é um dispositivo que mede a aceleração específica de um objeto. A aceleração específica é a aceleração

que um objeto experimenta em relação à gravidade. Em termos simples, um acelerômetro mede a taxa de mudança na velocidade de um objeto em uma ou mais direções (imagem 15), também é utilizado strain gauge um sensor utilizado para medir a deformação ou tensão em um objeto. Ele funciona convertendo a mudança na tensão elétrica em resposta à deformação mecânica sofrida pelo objeto, O princípio de funcionamento de um strain gauge é baseado na mudança na resistência elétrica do material condutor quando ele é submetido a uma deformação mecânica (imagem 16).

Figura 15: Estrada de terra



Fonte: Endevco (2025)

Figura 16: fixação de strain gauge



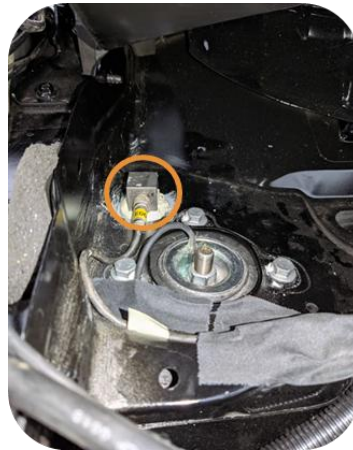
Fonte: binsfeld (2025)

A edição de sinais, como rapidamente definida, consiste basicamente na remoção de trechos do sinal onde o veículo percorre trechos planos, insignificantes para a fadiga. Contudo, ainda existe um outro tipo de edição também muito utilizado: a remoção de trechos que apresentam variações em amplitude muito baixas, sendo esta aceleração, tensão ou deformação.

Tais pequenas variações na maioria das vezes são geradas por ruídos durante a medição, ou são mesmo solicitações de baixo ciclo. Novamente aqui, estas baixas oscilações são consideradas insignificantes para a vida em fadiga. Com a remoção destes baixos ciclos, o tempo do teste simulado é reduzido mais ainda, realizando assim os objetivos em bancada.

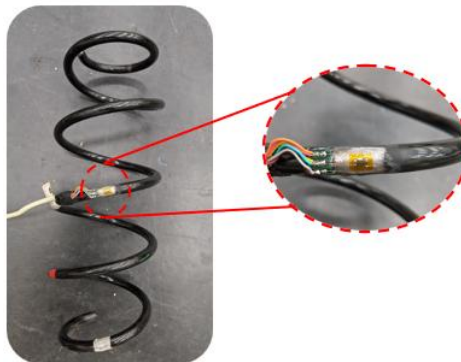
As imagens (17,18,19 e 20) possibilitam visualizar fixações de instrumentações em diversos componentes no veículo automotivo para aquisição de sinal.

Figura 17: Fixação de acelerômetro



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 18: Fixação de strain gauge em mola helicoidal



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 19: Fixação de strain gauge carroceria



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 20: Fixação de termopar



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

2.7 Processos de fadiga

2.7.1 Processo de Fadiga Torcional

Tem-se como definição de fadiga o seguinte conceito: processo de degradação localizada, progressiva e permanente, que ocorre em material sujeito a variações de tensões e deformações e que produzem a nucleação de trincas ou a completa fratura depois de um número suficiente de ciclos. (BOTELHO, 2018 apud ASTM-E 823-96, 2000).

Muller (2017) define que todas as falhas por fadiga têm início em uma pequena trinca que pode estar presente nos componentes desde sua manufatura ou que se desenvolvem ao longo da vida dos componentes.

Uma falha por fadiga, usualmente, começa na superfície da peça em pontos de concentração de tensão. Inicia-se com o aparecimento de uma fissura não detectável a olho nu. Uma vez iniciada a fissura, o efeito de concentração de tensões torna-se maior e a fissura progride mais depressa. À medida que a área tensionada diminui de tamanho, devido ao aumento da fissura, a tensão aumenta de intensidade até, finalmente, a peça partir-se subitamente. (SANTOS, 2008)

Os testes de fadiga torcional são realizados para simular as condições de operação do eixo traseiro sob diferentes cargas e ciclos de torção. Durante esses experimentos, é fundamental monitorar o comportamento do material e identificar os pontos de falha. A literatura aponta que a fadiga torcional pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a geometria do eixo, o tipo de material utilizado e as condições de carregamento (Santos et al., 2020; Oliveira & Lima, 2019).

Uma falha por fadiga, portanto, caracteriza-se por duas áreas distintas de fratura. A primeira delas é devida ao desenvolvimento progressivo da fissura, enquanto que a segunda se deve a fratura súbita. A zona da fratura súbita assemelha-se muito à fratura de um material frágil, como ferro fundido, que tenha falhado a tração. (SANTOS, 2008)

Segundo Angelo (2007) o termo fadiga refere-se à capacidade de “cansar” o material, através dos esforços cíclicos alcançados durante um certo período e tempo até a ruptura. Como a maioria dos materiais de engenharia está sujeita a cargas cíclicas, é muito importante a compreensão do mecanismo de falha: estima-se que

cerca de 90% das falhas metálicas são causadas pela fadiga, que costuma causar danos severos e abruptos.

Na análise das propriedades dos materiais relacionadas ao diagrama tensão-deformação, de acordo com Botelho (2018) é comum aplicar a carga gradualmente, permitindo o desenvolvimento adequado das deformações. Em condições normais, os corpos de prova são testados até a sua falha, de modo que as tensões sejam aplicadas uma única vez. Essas condições, conhecidas como estáticas, são frequentemente encontradas em componentes estruturais e mecânicos.

No entanto, Santos (2008) aduz que em muitas estruturas, as tensões podem variar ao longo do tempo. Por exemplo, um elemento na superfície de um eixo rotativo, sujeito a cargas de flexão, experimentará tração e compressão alternadamente a cada rotação do eixo. Se o eixo for parte de um motor elétrico que gira a 1725 RPM (rotações por minuto), o elemento será submetido a tensões de tração e compressão 1725 vezes por minuto.

Além disso, segundo Muller (2017) se o eixo também for carregado axialmente (por exemplo, devido a uma engrenagem helicoidal ou parafuso sem fim), ocorrerá uma superposição de um componente axial de tensão sobre as tensões de flexão. Isso resultará no aparecimento, em outro ponto do corpo e com diferente intensidade, de outra tensão variável. Esses tipos de cargas, presentes em componentes de máquinas, geram tensões conhecidas como repetidas, alternadas ou flutuantes.

De acordo com Ângelo (2007) encontra-se componentes de máquinas que falharam devido a tensões repetidas ou variáveis, cujos níveis máximos estavam abaixo do limite de resistência do material e, frequentemente, até abaixo do limite de escoamento. Um aspecto marcante se caracteriza por grande número de ciclos de tensão, sendo conhecidas como falha por fadiga.

Botelho (2018) afirma que uma falha por fadiga geralmente se inicia na superfície da peça em áreas de concentração de tensão. Começa com o surgimento de uma fissura que não é visível a olho nu e pode não ser detectada em inspeções por partículas magnéticas ou por raio X.

À medida que a fissura se desenvolve, Santos (2008) destaca que o efeito de concentração de tensões aumenta, acelerando o avanço da fissura. Conforme a área tensionada diminui devido ao crescimento da fissura, a intensidade da tensão aumenta até que a peça se rompe subitamente. Assim, uma falha por fadiga é caracterizada por duas áreas distintas de fratura. A primeira resulta do

desenvolvimento progressivo da fissura, enquanto a segunda ocorre devido à fratura súbita. A zona de fratura súbita se assemelha à fratura de um material frágil, como o ferro fundido, que falhou sob tensão de tração.

Para Muller (2017) as falhas estáticas geralmente são visíveis e dão um aviso prévio, pois ocorrem quando a tensão ultrapassa o limite de escoamento do material. Isso permite que a peça seja substituída antes que a fratura ocorra. Por outro lado, as falhas por fadiga são imprevisíveis, ocorrendo de forma súbita e resultando na perda total da peça, tornando-as muito perigosas.

De acordo com Ângelo (2007) o dimensionamento para evitar uma falha estática é relativamente simples, pois o mecanismo é bem compreendido. No entanto, a fadiga é um fenômeno muito mais complexo e menos compreendido. Para ter sucesso nesse campo, o engenheiro deve adquirir o máximo de conhecimento possível sobre fadiga. A falta de compreensão desse fenômeno pode levar a projetos com fatores de segurança excessivos, o que os torna não competitivos em termos de peso e custo no mercado atual. Além disso, não há garantia de que um projeto superdimensionado não falhará.

2.7.2 Mecanismo de fadiga

Existem diferentes processos pelos quais a falha dos materiais é estimulada pela aplicação de cargas cíclicas. Cada um desses processos de fadiga pode ser subdividido em diferentes estágios nos quais ocorrem o dano cíclico e a formação de trincas:

- Fadiga cíclica: ocorre em decorrência da aplicação de repetidos ciclos de tensão ou deformação em um componente. Podendo ser:
 - de alto ciclo: o nível de tensão aplicado é inferior ou próximo à tensão de escoamento do material;
 - de baixo ciclo: se o nível de tensão aplicada causa deformação plástica externa ou localizada no material.
- Fadiga por corrosão: existem os ciclos repetidos de tensão, mas o início do processo é causado pela ação da corrosão na superfície externa do componente, criando um concentrador de tensões geométrico;

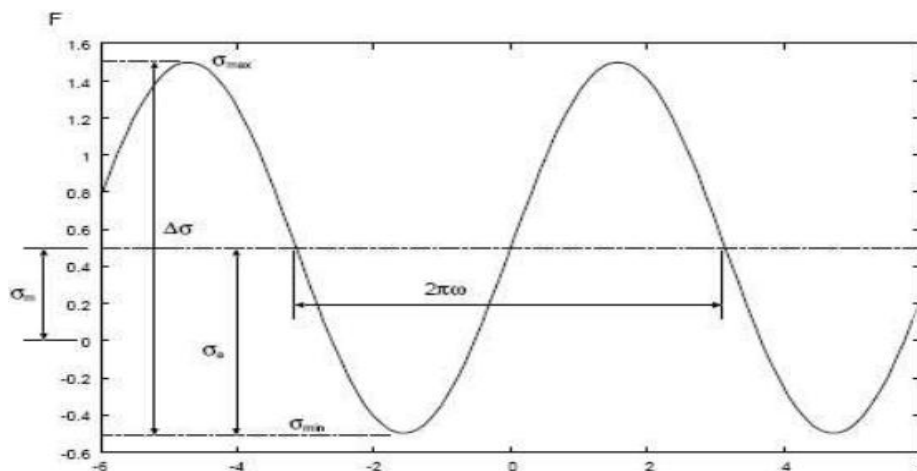
- Fadiga por *fretting*: os agentes promotores deste fenômeno são os movimentos de baixa amplitude entre as superfícies de contato, nas quais não existem movimentos relativos entre si. A consequência imediata é a abrasão e a formação de concentradores de tensão geométricos;
- Fadiga térmica: fenômeno causado pelas repetidas variações na temperatura do material, nas quais os diferentes coeficientes de dilatação térmica produzem tensões internas suficientes para que ocorra a fadiga cíclica;
- Fadiga de contato: é um tipo particular de fadiga que ocorre com muita frequência em componentes projetados para estar continuamente em contato um com o outro (engrenagens, por exemplo), nos quais as cargas flutuantes produzem danos superficiais que promovem a nucleação de trincas de fadiga;

2.7.3 Carregamentos no processo de fadiga

Segundo Angelo (2007) em geral, existem três tipos de carregamentos, tensão-tempo ou deformação tempo, (amplitude constante, por bloco e variável) que são utilizados no estudo da fadiga de um material: Carregamento com amplitude constante: Esta é a condição mais simples de carregamento em fadiga, onde se tem uma carga variando com o tempo, em máxima e mínima amplitude (Figura 21). Assim, quando a amplitude é simetricamente distribuída durante o tempo (a tensão média é zero) tem-se o chamado ciclo reverso de tensões.

A Figura 21 representa um componente com pré carga estática seguido de um carregamento dinâmico de modo mantendo amplitude constante.

Figura 21: Gráfico Tensão x Tempo com amplitude constante e assimétrica



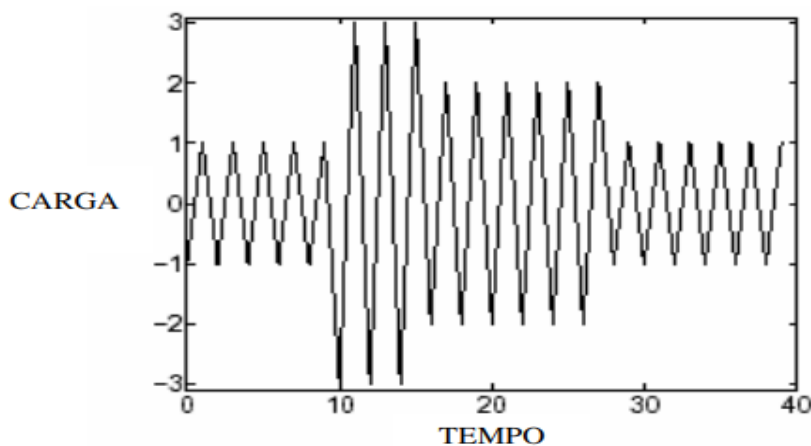
Fonte: Angelo (2007)

Na Figura 21 estão indicados parâmetros usados para descrever a tensão flutuante. A amplitude de tensão varia em torno de uma tensão média m , definida como a média entre os picos de tensão:

2.7.4 Carregamento por Bloco

Neste caso de carregamento a tensão é aplicada em blocos facilmente identificáveis Figura 22. Estes blocos são considerados como trechos de carregamento por amplitude constante, seguidos por outro com amplitude diferente, mas ainda constante, por exemplo aumentar a frequência de algo gradativamente ou abaixar gradativamente.

Figura 22: Exemplo de carregamento por blocos de amplitude constante

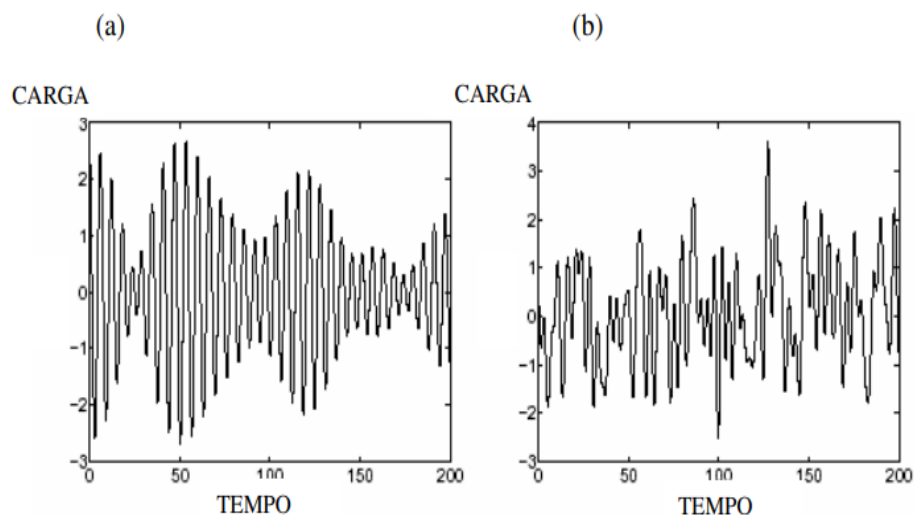


Fonte: Angelo (2007)

2.7.5 Carregamento com Amplitude Variável

Um veículo em movimento em uma estrada não é submetido a carregamentos como os representados na Figura 22, onde a amplitude é constante. O simples fato de o automóvel estar ou não com carga altera completamente o estado de solitação. Com as irregularidades do solo, sobre e subcargas são experimentadas, assim como diversos trechos onde dominam diferentes tensões médias. As Figuras 23a e 23b apresentam exemplos desse comportamento.

Figura 23: Dois tipos de carregamento com amplitude variável: (a) estreita faixa de variação, (b) grande faixa de variação.



Fonte: Angelo (2007)

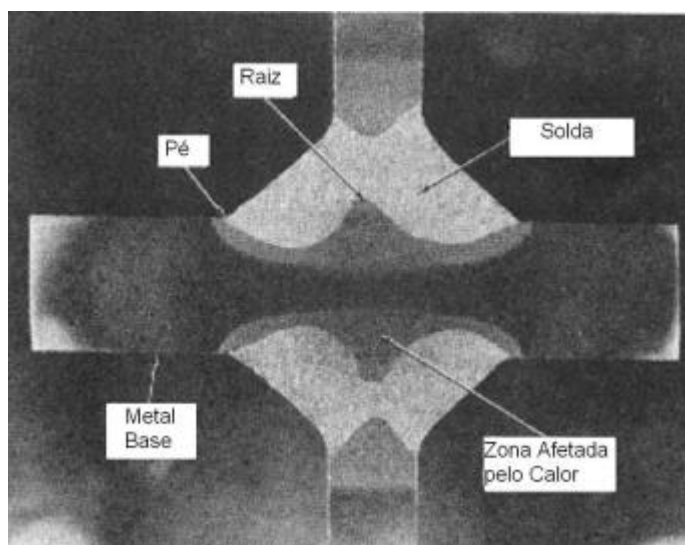
2.8 Processo de fabricação

2.8.1 Soldagem

O item 6 da ABNT NBR (Normas Técnicas Brasileiras) 8800:2008 trata de ligações metálicas e, em seu subitem 6.2, traz as especificações necessárias para o dimensionamento de soldas. Quanto à determinação da força resistente de cálculo, a norma classifica os tipos de soldagem em quatro diferentes grupos, sendo eles: solda de penetração total, solda de penetração parcial, filete e tampão em furos e rasgos. Segundo Bellei e Pinho (2008), o tipo mais utilizado é o de filete, pois é o tipo mais econômico quando se trata de cargas de pouca intensidade. No caso de cargas de alta intensidade, os autores aconselham o uso de solda de penetração total ou parcial, pois estas possuem alta resistência com um volume inferior de solda. A força resistente de cálculo para os diferentes tipos de soldagem, segundo a NBR 8800, depende da área efetiva de solda e área do metal base, obtida pela multiplicação do comprimento da solda pela espessura do material-base da espessura média (denominada largura efetiva), e depende também da menor resistência ao escoamento entre os metais-base da junta e a resistência mínima à tração do metal da solda. Tanto nos casos de penetração total e parcial quanto nos casos de solda de filete, não é necessário considerar a tração e compressão paralelas ao eixo da solda. Os tipos de solicitação e orientação também estão descritos na norma.

A solda é um dos processos de união que avalia flexibilidade e baixo custo, sua utilização está intrinsecamente ligada à indústria em geral, indo desde a manutenção de maquinário até a soldagem de componentes em um ônibus espacial. Juntas metálicas, unidas por processos de soldagem, apresentam como consequência deste processo, regiões críticas, devido a variações de rigidez, concentradores de tensões geométricas e altos gradientes de temperatura, que resultam em distorções, variações microestruturais e de propriedades mecânicas e tensões residuais. Todos estes efeitos estão presentes na ZTA (zona termicamente afetada), apresentada na Figura 24, assim como as demais regiões de uma junta soldada.

Figura 24: Região de uma junta soldada.



Fonte: (adaptado de FUCHS & STEPHENS, 1980)

A solda por robô é uma tecnologia amplamente utilizada na indústria moderna, oferecendo precisão, repetibilidade e eficiência. No entanto, a parametrização inadequada do processo de solda pode levar a uma série de falhas que comprometem a qualidade da solda e a integridade das peças. Essas falhas podem ser atribuídas a diversos fatores, incluindo configurações incorretas, falta de calibração e inadequação dos parâmetros de soldagem.

Um dos principais problemas relacionados a falhas de parametrização é a configuração inadequada da velocidade de soldagem. Se a velocidade for muito alta, pode resultar em uma penetração insuficiente, levando a soldas fracas e com baixa resistência. Por outro lado, uma velocidade muito baixa pode causar superaquecimento, resultando em deformações e distorções nas peças (Silva et al., 2021). Portanto, é crucial encontrar um equilíbrio adequado entre a velocidade de soldagem e a qualidade desejada.

Outro aspecto importante é a escolha dos parâmetros de corrente e tensão. Parâmetros inadequados podem causar problemas como respingos excessivos, que não apenas afetam a estética da solda, mas também podem comprometer a resistência mecânica da união (Oliveira & Santos, 2020). A calibração regular dos equipamentos de soldagem é essencial para garantir que os parâmetros estejam dentro das especificações recomendadas pelo fabricante.

Além disso, a falta de um controle adequado da temperatura do material base pode levar a falhas na solda. Materiais que não estão na temperatura ideal podem

resultar em uma má fusão, o que compromete a qualidade da solda (Pereira, 2022). A implementação de sistemas de monitoramento em tempo real pode ajudar a detectar e corrigir essas falhas antes que se tornem um problema significativo. A programação do robô também desempenha um papel crucial na parametrização do processo de solda. Erros na programação, como trajetórias inadequadas ou movimentos imprecisos, podem resultar em soldas inconsistentes e de baixa qualidade (Costa & Lima, 2023). A realização de simulações antes da execução do processo pode ajudar a identificar e corrigir esses problemas.

2.8.2 Estampagem

As operações de estampagem podem ser resumidas em três básicas: corte; dobramento; embutimento ou repuxo. Enquanto as estampagens em corte e dobramento são realizadas a frio, a de repuxo pode eventualmente ser a quente, dependendo da necessidade.

2.8.2.1 Estampo de corte

A estampagem de corte (ou cisalhamento), como o próprio nome sugere, tem como objetivo cortar a matéria prima visando obter o produto final. Este processo possui três etapas típicas, que são influenciadas diretamente pela folga deixada entre o punção e a cavidade da matriz, conforme destaca (DIETER, 1981, pág. 575). As matrizes envolvidas neste processo, em geral, são complexas – principalmente para estampos progressivos, e exigem rigidez e precisão dimensional elevada. Portanto, devem ser fabricadas com aço de alta resistência mecânica ou ligado, denominados “aços ferramentas”, conforme destacam Filho et al. (1986 e 1997), e apresentar excelente acabamento superficial e dimensional. Estes dispositivos exigem ainda tratamento térmico (têmpera e revenimento) e/ou superficial, recobrimento por PVD (deposição física de vapor), ou CVD (deposição química de vapor), etc. Visando aumentar sua dureza e evitar seu desgaste prematuro, já que este processo é indicado para uma elevada taxa de produção. Os estampos compõem-se de um conjunto de peças ou placas que, associado a prensas ou balancins, executa operações de corte e de dobra para produção de peças em série. Durante o processo, o material é cortado de acordo com as medidas das peças a serem estampadas, a que se dá o nome de

tira. Quando se corta numa tira de material as formas de que se necessita, a parte útil obtida recebe o nome de peça. O restante de material que sobra chama-se retalho.

2.8.2.2 Estampo de dobra

O estampo de dobra é também conhecido como dobrador. É formado de punção e matriz e, geralmente, guiado pelo cabeçote da prensa ou placa-guia. O punção é uma peça de aço, temperada e revenida, cuja parte inferior tem um perfil que corresponde à superfície interna da peça. Pode ser fixado diretamente no cabeçote da prensa ou por meio da espiga. A matriz é de aço e sua parte superior tem a forma da parte exterior da peça. Pode ser fixada diretamente sobre a mesa da prensa. Geralmente, é sobre a matriz que se fixam as guias do material da peça, que são elementos adaptados ao estampo para dar uma posição adequada de trabalho. Existem estampos mistos cujas estruturas são o resultado da união dos estampos de corte e de dobra. Os estampos mistos realizam as duas operações, tanto de corte como de dobra. A estampagem de dobra (ou dobramento) consiste em transformar um material em uma peça útil a partir do seu dobramento num dado ângulo e/ou curvatura previstos no projeto, resumido de DIETER (1981) e FILHO et al. (1986 e 1997). Para isto são utilizados maquinários específicos. Sendo que, para produção em larga escala recomenda-se adotar matrizes semelhantes àquelas utilizadas na estampagem de cisalhamento, porém projetando estas para realizar a dobra com apenas um golpe, ou ainda, equipamentos automatizados como dobradeiras hidráulicas de setup rápido. Já para pequenos lotes de produção podem ser utilizadas dobradeiras manuais, denominadas viradeiras, que exigem um investimento menor e tem fácil operação. O ferramental (matriz e punção) utilizado nestes equipamentos deve ser fabricado de aço ferramenta, temperado e retificado, visando garantir sua vida útil e precisão dimensional, bem como, acabamento adequado. A operação de dobramento, em dobradeira, pode ser classificada como “dobra livre” ou “em vazio”, pois o material que sofre a deformação não entra em contato com o fundo do canal da matriz em “V”. Sendo apoiado em três pontos: nas bordas do canal da matriz e no raio da ponta do punção – os quais se encarregam de dar o raio interno da dobra. Como o contato entre o material e as ferramentas é pequeno, também será menor a força exigida para a operação, apresentando baixo atrito. Este tipo de dobra também fornece as melhores condições de verificar e corrigir o efeito da recuperação elástica

do material (spring back) conforme destacam GRÜNING (1973) e DIETER (1981). Fenômeno este que ocorre em todos os processos de conformação de chapas.

2.8.2.3 Estampo de repuxo

A estampagem de repuxo (ou embutimento), que em muitas bibliografias também é denominada de estampagem profunda, ex.: Filho et al., (1986 e 1997); Dieter (1981), consiste naquele processo que visa transformar uma chapa plana num corpo oco (semelhante a um copo, de formato cilíndrico, cônico ou parecido a estes), através de uma ou mais etapas. Como exemplo, cita-se a fabricação de latas de refrigerantes, cervejas, sucos e aerossóis, utensílios domésticos (panelas, baixelas e fôrmas diversas), etc. As matrizes utilizadas também são de materiais de alta dureza como aço ferramenta, com tratamento térmico e/ou superficial adequado, visando aumentar sua vida útil e minimizar o desgaste e as condições de atrito. Neste processo o material escoia para dentro da cavidade da matriz, o que exige na maioria dos casos um prensa chapas (sujeitador) para evitar o enrugamento e/ou outros defeitos das bordas ou flanges da peça final, descrito por Dieter (1981), Grüning (1973) e Bresciani Filho et al. (1986 e 1997). Venkatesh e Goh (1986) salientam que os processos por matriz metálica (ex.: estampagem convencional) conseguem obter elevados índices de produtividade, maior do que aqueles processos que utilizam matrizes flexíveis, como o processo Guerin, que ao contrário dos processos convencionais utiliza ferramentas flexíveis (matrizes ou punções) para realizar a conformação do material (DIETER, 1981).

- Estouro de chapa

O estouro da chapa é um fenômeno crítico que pode ocorrer durante os processos de corte e estampagem de metais. Esse problema se manifesta quando a força aplicada ao material excede sua resistência, resultando em deformações indesejadas, como bordas irregulares ou até mesmo a ruptura da chapa. A compreensão desse fenômeno é essencial para garantir a qualidade das peças produzidas e a eficiência do processo industrial.

Diversos fatores podem contribuir para o estouro da chapa. A espessura do material é um dos principais aspectos a ser considerado, uma vez que chapas mais

espessas tendem a ser mais suscetíveis a esse tipo de falha (Santos, 2020). Além disso, o tipo de material utilizado, como diferentes ligas de aço, também influencia a resistência ao corte. Materiais com alta ductilidade podem se comportar de maneira diferente sob pressão em comparação com materiais mais rígidos (Oliveira & Lima, 2019).

Outro fator importante é a condição da máquina de corte. Máquinas mal calibradas ou com ferramentas desgastadas podem aumentar a probabilidade de estouro, pois não aplicam a força de maneira uniforme (Pereira, 2021). Portanto, a manutenção regular e o ajuste adequado das máquinas são fundamentais para minimizar esse risco.

Para mitigar o estouro da chapa, é recomendável a implementação de técnicas de controle de qualidade durante o processo de produção. Isso inclui a realização de testes de resistência do material e a análise das condições de operação da prensa (Silva et al., 2022). Ajustes na pressão aplicada e na velocidade de corte também podem ser realizados para otimizar o processo e reduzir a incidência de falhas. Em suma, o estouro da chapa no processo de corte e estampagem é um desafio significativo na indústria metalúrgica.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado como método estudo de caso e experimento realizado pelo autor, teses, dissertações e livros, em língua portuguesa, em um período de 10 anos. Nos quais foram utilizados como base de dados para o desenvolvimento da pesquisa: Google Acadêmico, Biblioteca virtual, Google livros. Sendo utilizado as seguintes palavras chaves: Fadiga de eixo, análise de fadiga, resistência mecânica, processos de fabricação.

3.1 Pesquisa em artigos

Motter (2020) desenvolveu um estudo de caso em Porto Alegre intitulado de estimativa de vida em fadiga de um eixo de veículo comercial submetido a diferentes perfis de pista, publicado pela Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, com objetivo de desenvolver uma abordagem para avaliar a vida em fadiga de um modelo de eixo de implemento rodoviário em pistas curvas e sem curvas com diferentes perfis

de rugosidade, conforme especificado pela norma ISO 8608. Esta metodologia integra elementos finitos (EF) com técnicas de dinâmica multicorpos (MBS) para identificar as cargas de serviço relevantes para a aplicação,

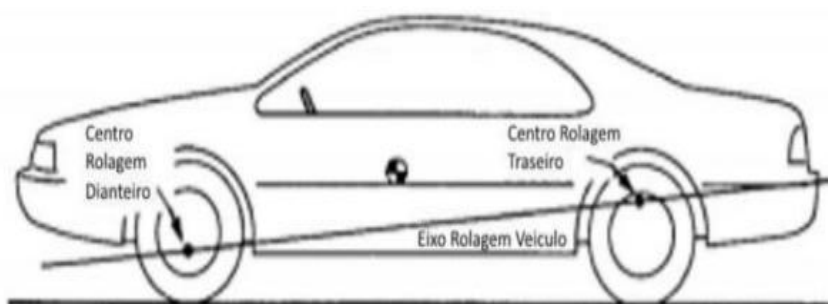
Motter (2020) observou nos resultados que a consideração da pré-tensão dos grampos resultou em deformações com deslocamentos mais positivos, indicando maior dano acumulado e menor vida em fadiga. Conforme esperado, os resultados demonstraram que o aumento do nível de rugosidade da pista está diretamente relacionado à diminuição da vida em fadiga. Por outro lado, o modelo sem curvas mostrou uma vida útil consideravelmente maior.

Sirio (2022) no município de Ouro Preto no estado de Minas Gerais elaborou seu estudo de caso denominado de aplicação da otimização topológica e análise de fadiga pelo método dos elementos finitos de uma ponta de eixo para um veículo *off-road*, publicado pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), com a finalidade de calcular o fator de segurança para uma vida útil infinita e sugerir novas geometrias com base nos resultados da otimização topológica aplicada ao componente atual, usando o método dos elementos finitos. O foco foi a compreensão da dinâmica veicular com ênfase no eixo traseiro.

Em seu estudo, Sirio (2022) ensina que a linha de eixo, também conhecida como eixo de rolagem, é determinada pela interseção entre os pontos centrais de rolagem da suspensão dianteira e traseira do veículo, indicando o ponto onde o chassi começa a se movimentar, através da Figura 25 é possível observar a posição de cada componente interno e identificar a localização do eixo de rolagem.

Com os dados do material definidos e a geometria CAD devidamente importada para a interface do Ansys, procede-se à etapa de discretização do modelo por meio da geração da malha, fazendo os testes, e após as análises dos resultados procede a análise de otimização topológica na ponta de eixo foi realizada, permitindo a avaliação de sua resistência à fadiga, a qual se mostrou satisfatória.

Figura 25: Eixo de rolagem em um automóvel de passeio



Fonte: Sirio (2022)

Dessa forma, Sirio (2022) conclui que foi possível constatar que o componente se saiu muito bem nas simulações, apresentando um fator de segurança satisfatório para fadiga. Isso permitiu uma margem para tentativas de otimização, resultando em novas geometrias. A simulação foi realizada a partir da ponta de eixo atual do Stark, definindo condições de contorno e esforços que representam situações reais para o projeto. Ela conseguiu apresentar o desempenho do componente em relação à fadiga e sugerir otimizações em sua geometria.

Por fim, apresenta-se o estudo de caso realizado por Galvão (2022) na cidade de São Carlos no estado de São Paulo intitulado de análise computacional de sistema mecânico e fadiga de molas em suspensões de veículos *off-road*, publicado pela Universidade Federal de São Carlos (UFSC), com objetivo de demonstrar uma maneira de estipular o limite de fadiga do eixo traseiro de veículos.

Por meio de análise modal ele encontrou as frequências naturais onde ele levou em conta a massa do modelo e rigidez do componente em análise.

Tabela 1: Frequências naturais de fadiga

Modo de vibração	Frequência natural [Hz]
1°	0,84345
2°	0,94925
3°	2,0987
4°	21,2044
5°	21,2085
6°	23,0662
7°	25,6671

Fonte: Galvão (2022)

Diante dos dados coletados, Galvão (2022) afirma que as frequências naturais de fadiga do modelo, que podem ser analisadas em conjunto com outras modais, geralmente determinadas por cada equipe. Os modos foram classificados em ordem crescente de frequência natural, conforme convenção, e estão listados na Tabela 1. Este item é apresentado antes dos resultados de cada obstáculo, uma vez que não depende do obstáculo. A análise modal não é baseada em uma força ou deslocamento como entrada. Portanto, embora as análises modais realizadas em elementos finitos produzam resultados com frequência modal, modos de vibração e valores para as saídas, os valores absolutos desses últimos não são significativos, pois não possuem representação física. Assim, a magnitude apresentada nos gráficos está compreendida entre -1 e 1, sendo utilizada apenas a proporção.

Portanto, Galvão (2022) conclui dizendo que os resultados foram consistentes e, ao verificar o sistema dinâmico e a fadiga das molas simultaneamente, é possível fazer comparações tanto em relação à ergonomia quanto ao cálculo estrutural. Ambas são áreas de estudo importantes para o desenvolvimento de um veículo *off-road* BAJA SAE, uma vez que a ergonomia desempenha um papel crucial no projeto e na apresentação de design, enquanto a fadiga é essencial para o cálculo estrutural.

3.2 Testes em bancada

Para o experimento físico foi utilizado bancada de testes, conforme (imagens 28, 29 e 30) composta por coluna para fixação do componente e atuador hidráulico conforme imagem 26, com célula de carga para realização do ciclo de fadiga. As especificações dos componentes utilizados estão informadas na Tabela 2:

Tabela 2: Especificações dos componentes utilizados no teste físico.

COMPONENTE	ESPECIFICAÇÃO
Atuador hidráulico MTS	Curso: ± 150 mm
Célula de carga MTS	Capacidade: 15000 N
Dispositivo simulando roda	Aço SAE 1020

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

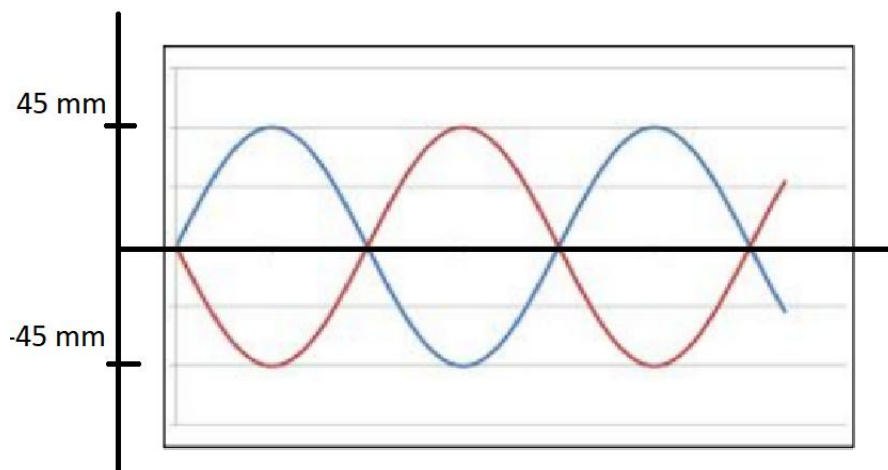
Figura 26: Atuador hidráulico MTS



Fonte: MTS (2025)

Foi utilizado para fadiga do eixo torcional no sentido Z, ± 45 mm (senóides defasadas de 180°), com frequência entre 1 e 2 Hz, 200.000 ciclos conforme normas técnicas determinadas pelo fabricante.

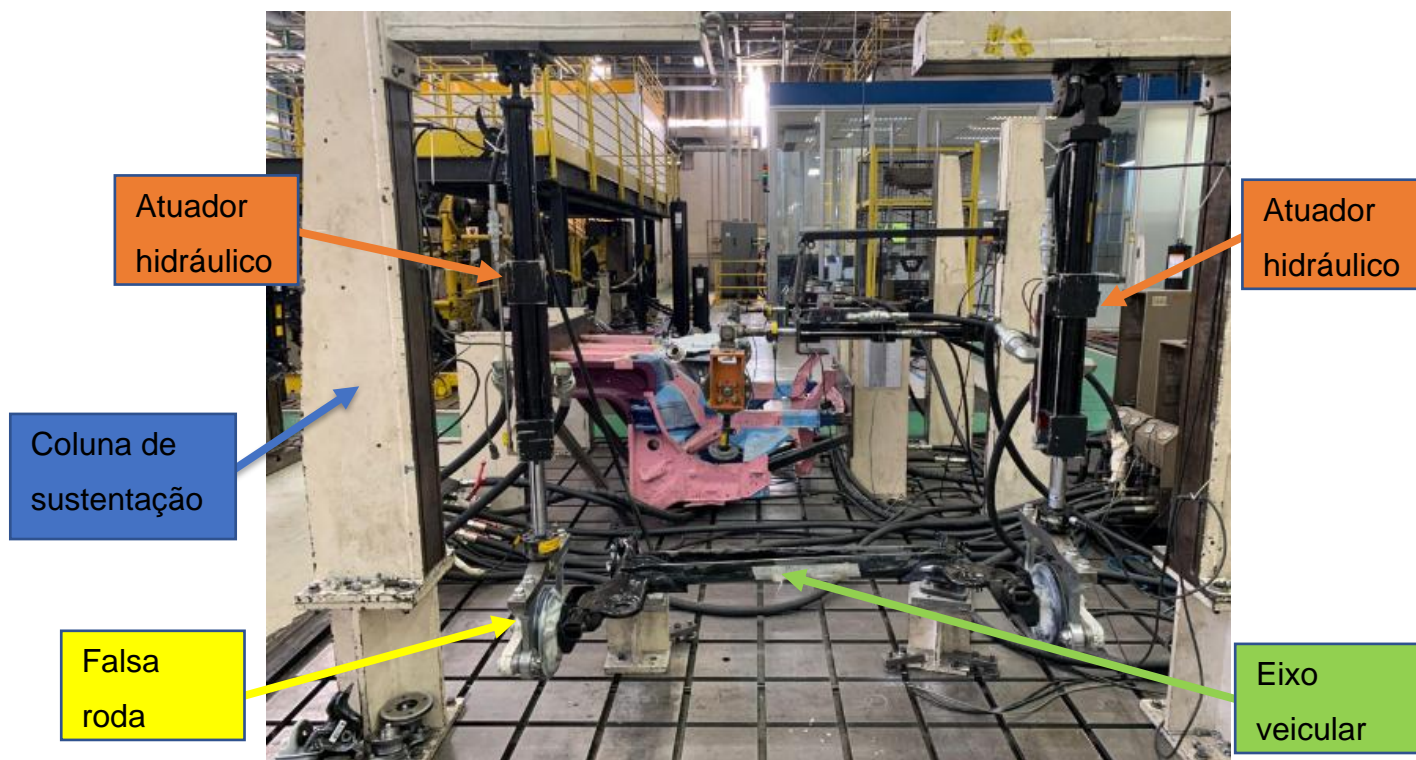
Figura 27: Gráfico de onda senoidal defasada a 180°



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O eixo foi fixado pelos seus suportes em duas bases por parafusos M12x1.25, e os atuadores hidráulicos foram fixados em colunas na posição vertical por parafusos de cabeça quadrada M12x1.25, nas pontas dos atuadores hidráulicos foram montadas células de carga para adquirir a carga aplicada no teste de fadiga torcional, e também uma falsa roda simulando uma roda com contato em seu ponto de raio sobre carga. Na figura 30 é facilmente identificado o modelo de montagem.

Figura 28: Montagem de prova de fadiga torcional do eixo traseiro.



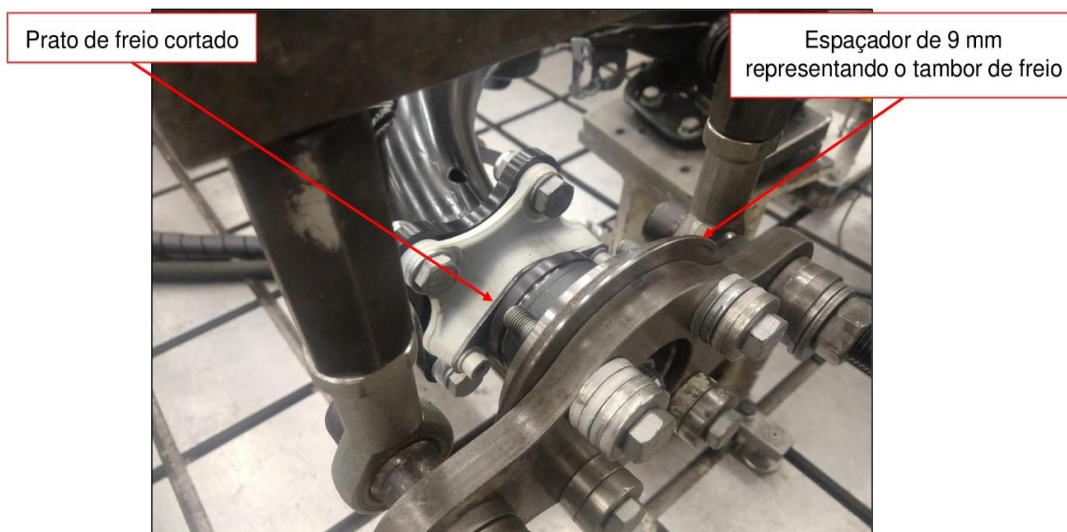
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 29: Montagem de prova de fadiga torcional do eixo traseiro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 30: Falsa roda.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

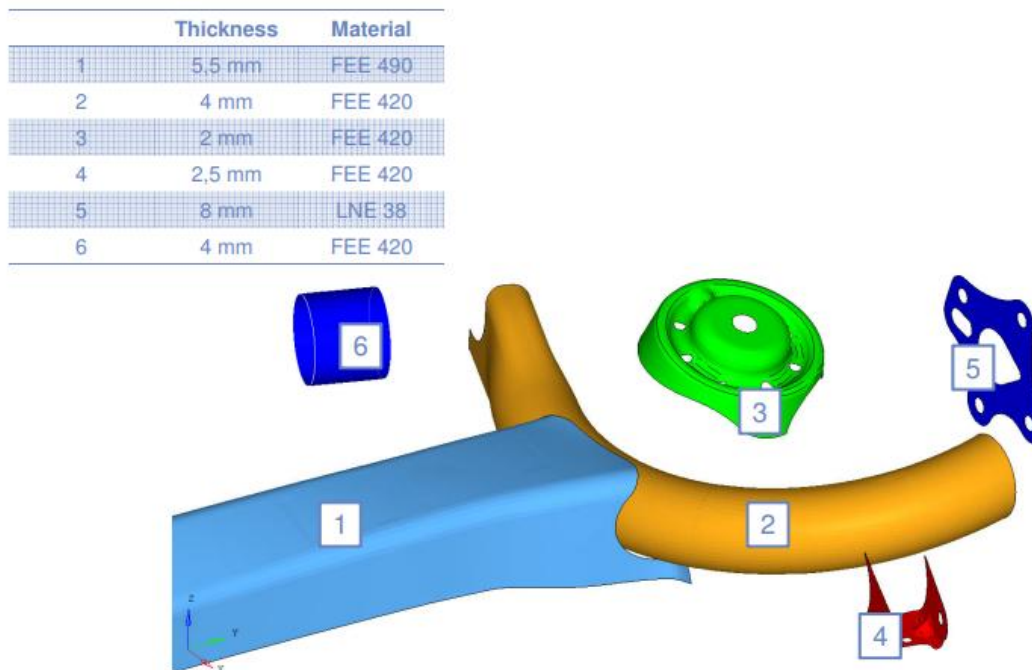
4 RESULTADO E DISCURSÃO

4.1 Resultado e discursão

O componente do eixo testado em bancada e composto pelos seguintes componentes numerados na imagem 31.

- Componente 1: Travessa do eixo traseiro, material FEE 490, espessura 5,5mm
- Componente 2: Trave do eixo, material FEE 490, espessura 4mm
- Componente 3: Suporte piatello da mola helicoidal material FEE 490, espessura 2mm
- Componente 4: Suporte do amortecedor traseiro material FEE 490, espessura 2,5mm
- Componente 5: Suporte para fixação do cubo de roda material LNE 38, espessura 8mm
- Componente 6: Suporte para bucha do eixo, material FEE 490, espessura 4mm

Figura 31: Componentes detalhados do eixo



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.2 Estudo de caso falha eixo traseiro do veículo de passeio

Devido a falha no eixo realizado em teste de bancada, foi evidenciado falhas no componente como visto nas imagens 32 e 33.

Figura 32: Falha na solda interna do eixo evidenciada em teste de bancada



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 33: Falha suporte mola evidenciada em teste de bancada



Trinca localizada a
85.000 ciclos

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Após análises foram separados em dois problemas.

Sendo a primeira falha no processo de soldagem e a segunda falha no processo de corte na estampagem.

4.2.1 Erro processo de soldagem

A soldagem por robô é uma tecnologia amplamente utilizada na indústria moderna, oferecendo precisão, repetibilidade e eficiência. No entanto, a parametrização inadequada do processo de solda pode levar a uma série de falhas

que comprometem a qualidade da solda e a integridade das peças. Essas falhas podem ser atribuídas a diversos fatores, incluindo configurações incorretas, falta de calibração e inadequação dos parâmetros de soldagem.

Um dos principais problemas relacionados a falhas de parametrização é a configuração inadequada da velocidade de soldagem. Se a velocidade for muito alta, pode resultar em uma penetração insuficiente, levando a soldas fracas e com baixa resistência. Por outro lado, uma velocidade muito baixa pode causar superaquecimento, resultando em deformações e distorções nas peças (Silva et al., 2021). Portanto, é crucial encontrar um equilíbrio adequado entre a velocidade de soldagem e a qualidade desejada.

Outro aspecto importante é a escolha dos parâmetros de corrente e tensão. Parâmetros inadequados podem causar problemas como respingos excessivos, que não apenas afetam a estética da solda, mas também podem comprometer a resistência mecânica da união (Oliveira & Santos, 2020). A calibração regular dos equipamentos de soldagem é essencial para garantir que os parâmetros estejam dentro das especificações recomendadas pelo fabricante.

Além disso, a falta de um controle adequado da temperatura do material base pode levar a falhas na solda. Materiais que não estão na temperatura ideal podem resultar em uma má fusão, o que compromete a qualidade da solda (Pereira, 2022). A implementação de sistemas de monitoramento em tempo real pode ajudar a detectar e corrigir essas falhas antes que se tornem um problema significativo. A programação do robô também desempenha um papel crucial na parametrização do processo de solda. Erros na programação, como trajetórias inadequadas ou movimentos imprecisos, podem resultar em soldas inconsistentes e de baixa qualidade (Costa & Lima, 2023). A realização de simulações antes da execução do processo pode ajudar a identificar e corrigir esses problemas.

Em resumo, as falhas de parametrização no processo de solda por robô podem ter um impacto significativo na qualidade das soldas e na eficiência do processo produtivo. A atenção cuidadosa aos parâmetros de soldagem, a calibração regular dos equipamentos e a programação precisa do robô são fundamentais para minimizar esses riscos e garantir a integridade das peças soldadas.

Em suma, foi evidenciado que o fornecedor no seu processo de soldagem, regulou os robôs para que fizessem um processo de soldagem mais rápido para ganhar produtividade na produção dos eixos onde ocasionou o problema de falha na

solda, pois quando essa velocidade é excessivamente alta, pode ocorrer uma penetração inadequada, resultando em soldas com baixa resistência e fragilidade.

Logo após essas observações foram refeitas as programações no equipamento do fornecedor, e o componente foi submetido novamente ao teste após a revisão da possível causa, e após o teste realizado em bancada apresentou a resistência desejada.

4.2.2 Erro processo de corte na estampagem

O estouro da chapa é um fenômeno crítico que pode ocorrer durante os processos de corte e estampagem de metais. Esse problema se manifesta quando a força aplicada ao material excede sua resistência, resultando em deformações indesejadas, como bordas irregulares ou até mesmo a ruptura da chapa. A compreensão desse fenômeno é essencial para garantir a qualidade das peças produzidas e a eficiência do processo industrial.

Diversos fatores podem contribuir para o estouro da chapa. A espessura do material é um dos principais aspectos a ser considerado, uma vez que chapas mais finas tendem a ser mais suscetíveis a esse tipo de falha (Santos, 2020). Além disso, o tipo de material utilizado, como diferentes ligas de aço, também influencia a resistência ao corte. Materiais com alta ductilidade podem se comportar de maneira diferente sob pressão em comparação com materiais mais rígidos (Oliveira & Lima, 2019).

Outro fator importante é a condição da máquina de corte. Máquinas mal calibradas ou com ferramentas desgastadas podem aumentar a probabilidade de estouro, pois não aplicam a força de maneira uniforme (Pereira, 2021). Portanto, a manutenção regular e o ajuste adequado das máquinas são fundamentais para minimizar esse risco.

Para mitigar o estouro da chapa, é recomendável a implementação de técnicas de controle de qualidade durante o processo de produção. Isso inclui a realização de testes de resistência do material e a análise das condições de operação da prensa (Silva et al., 2022). Ajustes na pressão aplicada e na velocidade de corte também podem ser realizados para otimizar o processo e reduzir a incidência de falhas.

Em suma, o estouro da chapa no processo de corte e estampagem é um desafio significativo na indústria metalúrgica.

Porém além de se obter um bom processo de corte e estampo da chapa foi padronizado o processo de lixamento da superfície de corte, pois com isso ocorreu uma grande eliminação dos convites de tricas que ocasionam a falha do componente, assim tendo maior vida ultimo no processo de fadiga e na vida em geral do componente.

5 CONCLUSÃO

A fadiga mecânica refere-se a um tipo de falha que pode ocorrer em componentes mecânicos, resultando em consequências econômicas significativas e, em alguns casos, colocando vidas em risco, uma vez que está diretamente relacionada a muitas falhas em tais componentes. Portanto, é fundamental estudar a fadiga, pois esse estudo permite estimar a durabilidade do material e escolher o tipo mais apropriado para cada componente, garantindo que ele desempenhe sua função de maneira eficaz. Além disso, é crucial analisar como o componente reagira com tensões e deformações cíclicas, a fim de determinar seus limites de carga e evitar que sejam submetidos a forças que não conseguem suportar.

O estudo também contribui para a diminuição de acidentes relacionados a esse fenômeno, reduzindo custos com reparos de componentes que falharam e assegurando a segurança das pessoas que utilizam automóveis feitos de materiais suscetíveis à fadiga. A análise de casos específicos destaca a importância de identificar e avaliar os pontos de concentração de tensão, uma vez que a tensão média tem um impacto direto na resistência à fadiga do material, podendo torná-lo mais ou menos resistente ao longo de sua vida útil.

A análise dessa falha ajudou a impulsionar a melhorar no processo de fabricação e na qualidade final de cada processo, evoluindo cada vez mais para a segurança de todos.

6 REFERÊNCIAS

ANGELO, Clayton Mamedes. **Fadiga de amplitude variável como parâmetro de projeto para eixos traseiros automotivos: uma análise do efeito das sobrecargas e da filtragem matemática na predição de vida em fadiga**, 2007.

ASTM. **ASTM E468 - Standard Test Method for High Cycle Fatigue Testing of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 2010.

BOTELHO, Luiz Fernando Alves. **Análise geral de falhas por fadiga**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, curso técnico de mecânica, 2018.

BLUNDELL, M. G., & HARTY, D. **The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics**. CRC Press, 2004.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna / Franco Brunetti 2. ed**, São Paulo Blucher, 2018.

CALLISTER JUNIOR, William D. **Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais**. Tradução de Sérgio L. Montenegro. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

Costa, R. A., & Lima, J. P. **Programação de Robôs para Soldagem: Desafios e Soluções**. Journal of Robotics and Automation, 12(1), 34-47, 2023.

DIN. DIN 743 - **Calculation of the Fatigue Strength of Shafts and Axles.** Deutsches Institut für Normung, 2007.

GALVÃO, Lucas Thomé Brilhante. **Análise computacional de sistema mecânico e fadiga de molas em suspensões de veículos off-road Baja SAE.** 2022.

GENTA, J. L. **Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks.** Swets & Zeitlinger, 2001.

GENTA, G. **Motor Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation.** Springer, 2009.

HARRIS, C. M. **Shock and Vibration Handbook.** McGraw-Hill, 1998.

HARRIS, C. M. Shock and vibration handbook. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1998.

ISO. ISO 10863 - Metallic Materials - **Fatigue Testing - Axial Load Fatigue Testing.** International Organization for Standardization, 1995.

MELO, J. R., Silva, A. P., & Santos, T. **Modelos de previsão de vida útil em componentes mecânicos.** Revista Brasileira de Engenharia Mecânica, 44(2), 123-135, 2022.

MOTTER, Maurício Slovinski. **Estimativa de vida em fadiga de um eixo de veículo comercial submetido a diferentes perfis de pista.** 2020.

MÜLLER, Tiago Augusto Meurer. **Análise de vida em fadiga de ponta de eixo traseiro utilizando o método de elementos finitos.** Pag 59. Joinville, 2017

OLIVEIRA, F. R., & Lima, C. A. **Fadiga em materiais: uma revisão.** Journal of Materials Science, 54(3), 456-470, 2019.

Oliveira, J. R., & Lima, M. A. **Materiais Metálicos: Propriedades e Aplicações.** Editora Metalúrgica, 2019.

Oliveira, M. T., & Santos, F. A. **Parâmetros de Soldagem: Impactos na Qualidade das Juntas.** Revista Brasileira de Soldagem, 18(2), 78-89, 2020.

PACEJKA, H. B. **Tire and Vehicle Dynamics**. Elsevier, 2006.

PEREIRA, L. M., & Costa, R. S. **Análise fractográfica de falhas em eixos mecânicos**. Materials Research, 21(4), 789-795, 2018.

Pereira, T. S. **Controle de Temperatura em Processos de Soldagem**: Importância e Métodos. Engenharia e Tecnologia, 15(4), 112-125, 2022.

Pereira, T. S. **Manutenção de Máquinas de Corte**: Práticas e Desafios. Revista de Engenharia Mecânica, 15(3), 45-58, 2021.

QUATRO RODAS. **Qual a diferença entre suspensão multilink e por eixo de torção?**. 2016. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/qual-a-diferenca-entre-suspensao-multilink-e-por-eixo-de-torcao>. Acesso em: 20 março 2024.

ROSA, Edison da. **Mecânica da Fratura e Fadiga**. 1. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

SAE. **SAE J1095 - Fatigue Testing of Automotive Components**. Society of Automotive Engineers, 2005.

Santos, F. A. **Corte e Estampagem de Metais: Teoria e Prática**. Editora Técnica, 2020.

SANTOS, M. A., Silva, J. R., & Almeida, P. **Influência da geometria na fadiga torcional de eixos**. Engenharia e Tecnologia, 45-58, 2020.

Silva, R. P., Costa, L. M., & Almeida, V. F. **Falhas Comuns em Processos de Soldagem Robótica**. Journal of Manufacturing Science, 10(3), 145-158, 2021.

Silva, R. P., Costa, L. M., & Almeida, V. F. **Controle de Qualidade na Indústria Metalúrgica**. Journal of Manufacturing Science, 10(2), 123-134, 2022.

SANTOS, Luciano Valdomiro. **Análise de falha por fadiga em eixo de motores para sistemas de arrefecimento**, pág. 122. São Paulo 2008.

SILVA, T. F.; COSTA, A. J.; LIMA, M. **Técnicas de inspeção não destrutiva em componentes**. [S.l.: s.n.], 2021.

SIRIO, Helmuth Mol Moraes. **Aplicação da otimização topológica e análise de fadiga pelo método dos elementos finitos de uma ponta de eixo para um veículo off-road**. 2022.

WONG, J. Y. **Theory of Ground Vehicles**. John Wiley & Sons, 2008.