

Revista Eletrônica



Volume 5 – Número 1 - 2025

Investigação da Ruptura de Eixos de Transmissão Automotiva.

Amanda Bernardes Zotte

amanda.zotte@aluno.ifsp.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

João Pedro Blagitz Ravache

b.ravache@aluno.ifsp.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Resumo

O presente artigo tem como objetivo investigar as principais causas de fratura por fadiga em eixos de transmissão automotiva. A fadiga é o principal modo de falha para estes componentes críticos, ocorrendo sob carregamentos cíclicos e resultando em rupturas que podem comprometer a segurança e a funcionalidade do veículo. Para a análise, foi empregado o Método de Elementos Finitos (MEF) por meio de softwares de engenharia assistida por computador (CAE), como *Autodesk Fusion 360*. A metodologia consistiu na modelagem tridimensional de um eixo de transmissão, seguida pela simulação de condições de carregamento realistas. Os resultados obtidos permitem diagnosticar as geometrias mais críticas e fornecem uma base para a otimização do projeto, visando aumentar a resistência à fadiga e prevenir falhas prematuras.

Palavras-chave

Fadiga, Elementos Finitos, Ruptura, Engenharia Assistida.

Abstract

This study investigates the main causes of fatigue fracture in automotive transmission shafts, a critical failure mode that occurs under cyclic loading and compromises both safety and functionality. The Finite Element Method (FEM) was applied using computer-aided engineering (CAE) software, specifically *Autodesk Fusion 360*. The methodology involved three-dimensional modeling of a transmission shaft followed by simulations under realistic loading conditions. The results highlight the most critical geometries and provide a foundation for design optimization aimed at improving fatigue resistance and preventing premature failures.

Keywords

Fatigue, Finite Elements, Rupture, Computer-Aided Engineering.

1 – Introdução

Este artigo apresenta uma investigação aprofundada sobre as causas de fratura por fadiga em eixos de transmissão automotiva, um tema de importância crítica para a segurança e confiabilidade de veículos e sistemas mecânicos. O estudo utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para simular e analisar o comportamento desses componentes sob carregamentos cíclicos, identificando pontos de falha.

1.1 - Eixo de Transmissão

Eixo de transmissão são componentes mecânicos vitais, utilizados vastamente em equipamentos que necessitam de transferência do movimento de rotação, torque e momento fletor. No contexto automotivo, sua função é conduzir a potência gerada pelo motor e gerenciada pela caixa de câmbio até as rodas motrizes (recebem a força do motor e convertem em movimento), impulsionando o veículo. (Heliar, 2025).

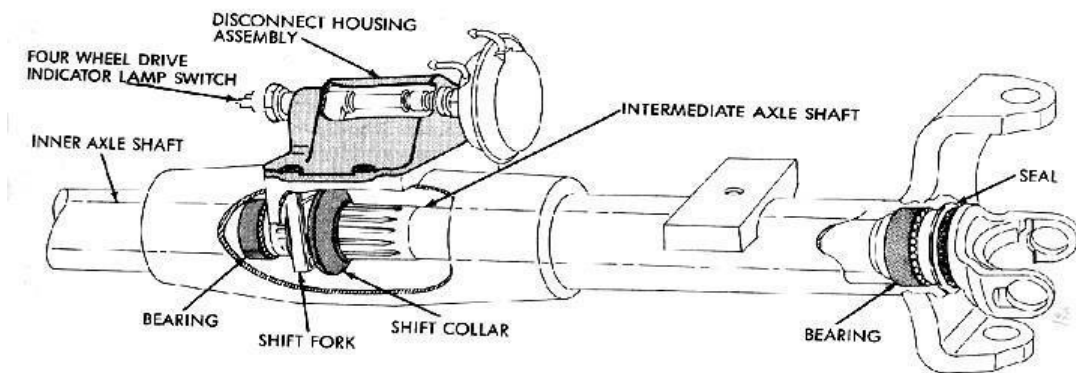


Figura 1 – Eixo de Transmissão – (Fonte: Mayank Sehdev 2025, The basics of transmission).

A sua aplicação varia dependendo do sistema de tração do veículo. Em carros com tração traseira (RWD) e integral, o eixo de transmissão, também conhecido como eixo cardan, conecta a caixa de câmbio ao diferencial traseiro. Por outro lado, em veículos de tração dianteira (FWD), a função de transmitir a força do diferencial para as rodas é realizada pelos semieixos.

Estão sujeitos a tensões cíclicas de torção, devido à transmissão de torque, e de flexão, resultante do peso dos componentes e das reações dinâmicas da suspensão. A natureza de seu meio torna-o particularmente suscetível às falhas por fadiga. A integridade estrutural de um eixo é de suma importância para a operação segura e confiável do veículo, e sua falha pode ter consequências graves.

1.2 - Objetivo

O objetivo central do presente artigo é investigar as principais causas de falha por fadiga em eixos de transmissão automotiva, utilizando simulações computacionais. A metodologia se concentra em analisar e comparar os resultados virtuais, obtidos com o Método dos Elementos Finitos (MEF), para identificar as geometrias mais críticas e os principais pontos de falha.

2 - Fundamentação Teórica

A análise de falha por fadiga requer uma compreensão dos princípios de resistências dos materiais e mecânica. Esta seção apresenta o embasamento teórico que auxilia a metodologia de simulação utilizada.

2.1 - Fadiga de Materiais

Fadiga de materiais é um processo que leva a falha mecânica local, causado por um carregamento alternado, variável, e geralmente de valor muito abaixo do que uma carga estática que leva a ruptura. (ARAÚJO, Eduardo 2025). O processo de falha por fadiga se desenvolve em três fases distintas:

Iniciação da Trinca: Ocorre em pontos de concentração de tensão, frequentemente na superfície do material. O acúmulo de dano cíclico leva à formação de microfissuras.

Propagação Estável da Trinca: A microfissura cresce de forma gradual e estável a cada ciclo de carregamento. As superfícies de fratura desta fase frequentemente apresentam "marcas de praia", indicando o crescimento progressivo da fissura.



Figura 2 – Falha por Fadiga. *Fonte: Inspeção de Equipamentos (2014).*

Fratura Final Catastrófica: Quando a trinca atinge uma dimensão crítica, a seção restante do componente não é mais capaz de suportar o carregamento, resultando em uma ruptura súbita e completa.

Outro fator determinante na indicação da fadiga é a concentração de tensão. Notável pela descontinuidade da geometria e acúmulo de material. Efeito pode ser quantificado pelo Fator de Concentração de Tensão (K_t).

2.2 Dano Cumulativo: Regra de Palmgren-Miner

Em cenários do mundo real, os componentes não são submetidos a uma amplitude de tensão constante, mas sim a um histórico de carregamento com amplitudes variáveis. De acordo com Ariduru (2004), a vida de fadiga de um elemento pode ser estimada utilizando a regra de Palmgren-Miner em conjunto com um método de contagem de ciclos. (MORAWSKI, Alexandre 2013).

Podendo ser quantificado pelo fator (B), o fator de utilização é calculado pela seguinte equação:

$$B = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

Onde n_i é o número de ciclos aplicados a uma tensão alternada S_i , e N_i é o número de ciclos necessários para causar falha sob a mesma tensão S_i (obtido da curva S-N).

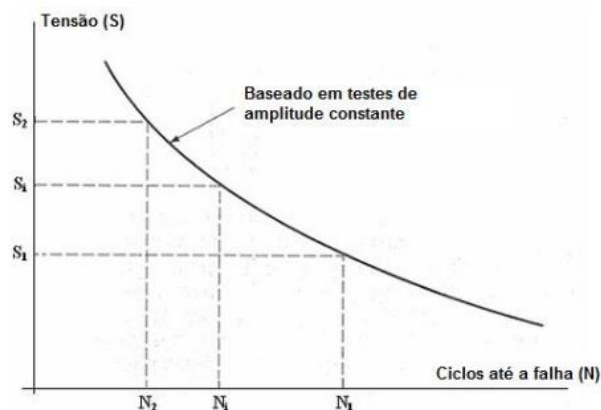


Figura 3 - Curva S-N de amplitude constante. Fonte: Modificado de Ariduru (2004)

2.3 - Propagação de Trincas: Lei Paris-Erdogan

A Lei Paris-Erdogan analisa propriamente a fase de propagação de trinca. Relacionando a taxa de crescimento da trinca (da/dN) com a variação de intensidade de tensão (ΔK) no ponto, por meio da equação:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^n \quad (2)$$

onde, a é o comprimento da trinca, N é o número de ciclos, e C e n são constantes do material.

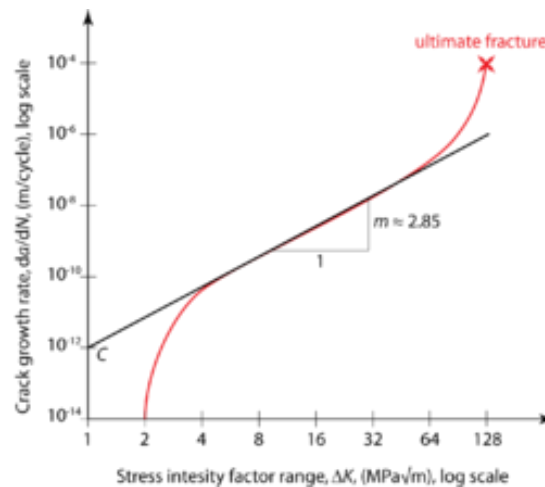


Figura 4 - Curva da taxa de crescimento da trinca. Fonte: Wikipédia (2025)

2.4 - Método dos Elementos Finitos

O método propõe que o número infinito de variáveis desconhecidas, sejam substituídas por um número limitado de elementos de comportamento bem definido. Essas divisões podem apresentar diferentes formas, tais como a triangular, quadrilateral, entre outras, em função do tipo e da dimensão do problema. (Mirlisenna, Giuseppe, 2016). As principais vantagens do MEF incluem:

- Prever o comportamento de estruturas antes de sua fabricação;
- Analisar com precisão as tensões, deformações e deslocamentos;
- Identificar pontos de concentração de tensão e prever falhas estruturais, incluindo a previsão da vida em fadiga.

3 - Materiais e Métodos

A análise apresentada neste estudo baseou-se na caracterização de materiais com a simulação numérica por (MEF). Para a análise, a definição correta do material foi crucial para evitar resultados falsos que invalidariam o estudo.

3.1 - Etapas da Pesquisa

O desenvolvimento do projeto foi realizado em etapas sequenciais para garantir a validação e a confiabilidade dos dados e informações apresentados. As etapas foram:

Levantamento Bibliográfico e Revisão Teórica: Inicialmente foi conduzido um estudo sobre fadiga e ponto de ruptura de eixo de transmissão e suas limitações, bem como seus principais causadores. Este levantamento orientou a escolha do eixo e a metodologia de testes.

Definição do Sistema: O software de modelagem 3D, Autodesk Fusion 360, foi selecionado para criar o modelo do eixo de transmissão do veículo Honda GL.

Montagem Preliminar e Testes com Auxílio de Softwares: Os primeiros experimentos foram realizados utilizando o software Fusion 360. Esse experimento passou por um processo de simulação de fadiga de (MEF).

Comparação entre Dados Extraídos por Auxílio de Softwares: Nesta fase, os dados extraídos pela simulação de (MEF) foram comparados entre si.

3.2 - Propriedades do Material

O material selecionado para a análise foi o aço SAE 4140, uma liga de cromo-molibdênio amplamente utilizada na indústria automotiva e de construção mecânica para componentes de alta responsabilidade, como eixos e engrenagens.

A escolha do material é justificada pela sua vasta aplicação no mundo automotivo, especialmente em componentes submetidos a altos esforços. Seu teor de cromo, fornece boa penetração da dureza. O carbono fornece a resistência mecânica, permitindo suportar altas tensões sem deformações plásticas. O molibdênio garante uma boa resistência à fadiga e fratura. O manganês, por sua vez, reforça a tenacidade, aumentando a resistência de choques mecânicos.

Essas características são fundamentais para o bom desempenho de eixos de transmissão e garante a maior confiabilidade nas análises realizadas no Fusion 360. (Aço Nobre, 2025).

As características que o tornam particularmente adequado incluem:

Alta Resistência Mecânica: Capacidade de suportar elevados níveis de tensão sem escoamento ou fratura.

Boa Tenacidade: Habilidade de absorver energia e resistir à propagação de trincas, especialmente sob cargas de impacto.

Elevada Resistência à Fadiga: Durabilidade superior sob carregamentos cíclicos, que é o principal modo de falha para eixos de transmissão.

Boa Temperabilidade: Permite obter uma microestrutura martensítica de alta dureza e resistência em seções transversais de maior espessura através de tratamento térmico de têmpera e revenido.

O conjunto apresentado trabalhando em união, torna-o ideal para sua aplicação no meio automotivo para seu uso em eixos de transmissão.

Tabela 1: Propriedades Mecânicas do Aço SAE 4140 (Condição Temperada e Revenida).

Propriedades	Valores
Densidade (ρ)	7750 kg/m ³
Gravidade Específica	7.75
Coeficiente de Poisson (ν)	0.29
Limite de Escoamento (S_y)	986 MPa
Limite de Resistência à Tração (UTS)	1075 MPa
Resistência à fadiga (S_e)	~500 - 650 MPa

Nota: o Limite de Resistência à Fadiga não passa de uma aproximação, que será explorada mais a fundo nas seções futuras.

3.3 - Cálculo de Grandezas

Para validar os resultados na simulação (CAE), será realizado os cálculos das principais grandezas que definem o comportamento do eixo. Esta etapa estabelece base teórica para analisar as tensões e prever o ponto de falha por meio de fadiga.

Massa Específica (ρ): A massa específica é a relação entre a massa de um material e o volume que ele ocupa. Ela indica quão compacto o material, dado por:

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (3)$$

Peso Específico: O peso específico pelo produto entre a massa específica de um objeto e a aceleração da gravidade. É uma medida adimensional, dada por:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (4)$$

Coeficiente de Poisson (ν): O coeficiente de Poisson é uma propriedade elástica que descreve como um material se deforma. É uma medida adimensional, dada por:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (5)$$

Limite de Escoamento (S_y): O limite de escoamento é a tensão na qual um material começa a se deformar plasticamente (permanentemente). Este valor é obtido experimentalmente em um ensaio de tração que consiste em aplicar uma força de tração crescente a um corpo numa máquina de ensaio, até que este comece a deformar-se permanentemente ou plasticamente.

Limite de Resistência à Tração (UTS): O limite de resistência à tração é a tensão máxima que o material pode suportar antes de começar a "estripar" e eventualmente fraturar. Assim como o limite de escoamento, é um valor obtido em um ensaio de tração onde uma amostra do material é esticada até quebrar, enquanto uma máquina mede a força aplicada e a deformação resultante.

Resistência à Fadiga (S_e): A resistência à fadiga é a capacidade de um material de resistir a cargas cíclicas repetidas. É obtida através de ensaios de fadiga, onde uma amostra do material é submetida a ciclos de carga (aplicando e removendo força repetidamente) até que a falha ocorra. A máquina registra a quantidade de ciclos que a amostra suporta sob uma determinada tensão antes de quebrar.

3.4 - Modelagem 3D e Geração de Malha

O uso do software para modelagem e simulação do eixo de transmissão é uma etapa crucial da metodologia, pois permite a análise de tensões e a previsão de falhas estruturais, como a fadiga, ainda na fase de projeto. A capacidade de testar o componente virtualmente reduz a necessidade de protótipos físicos e os custos de desenvolvimento. O estudo utilizou como base a geometria de um eixo de transmissão do veículo *Honda GL* para a modelagem 3D, conforme ilustrado abaixo:

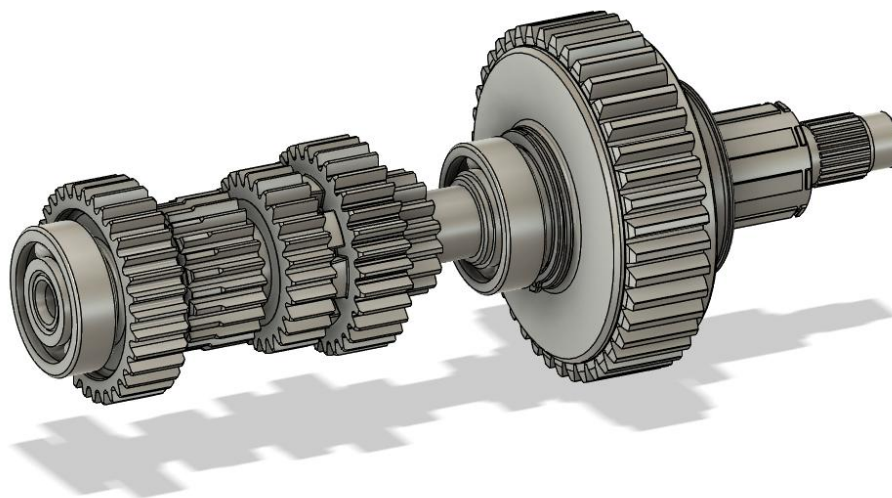


Figura 5 - Eixo de transmissão Honda GL. Fonte: Danny Key, Grab Cad

Para a análise, foi modelado um segundo componente, que serviu como ponto de comparação: um cilindro com diâmetros e comprimentos semelhantes, com a principal característica da ausência de cantos vivos ou entalhes. O objetivo deste segundo modelo foi avaliar a diferença nos resultados de tensão e vida útil na ausência de concentradores de tensão, que são os principais pontos de falha por fadiga em componentes mecânicos.

3.4.1 - Geração da Malha de Elementos Finitos

Este processo é fundamental, pois a qualidade da malha influencia diretamente a precisão dos resultados da simulação. O método dos elementos finitos substitui a geometria complexa por um número finito de elementos de comportamento bem definido, como tetraedros ou hexaedros.

Para ambos os modelos (o eixo real e o cilindro simplificado), foi gerada uma malha com elementos tetraédricos, que são versáteis para se adaptar a geometrias complexas. Abaixo, as imagens ilustram os modelos já com a malha de elementos finitos gerada e os apoios (mancais) que simulam as condições de contorno da operação real:

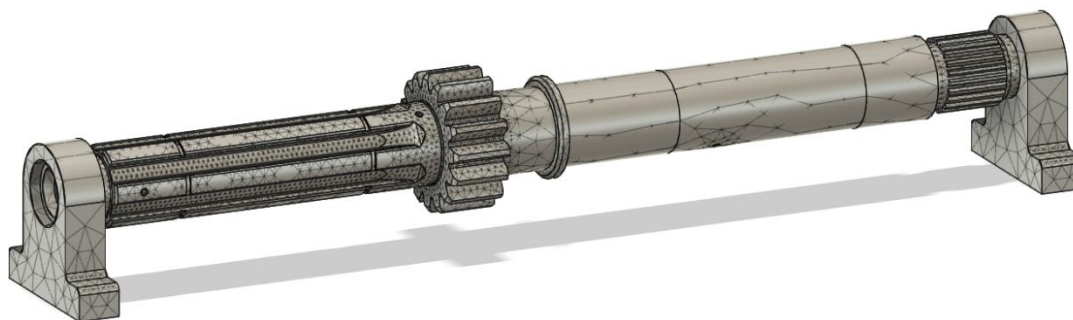


Figura 6 - Eixo de transmissão com malhas.

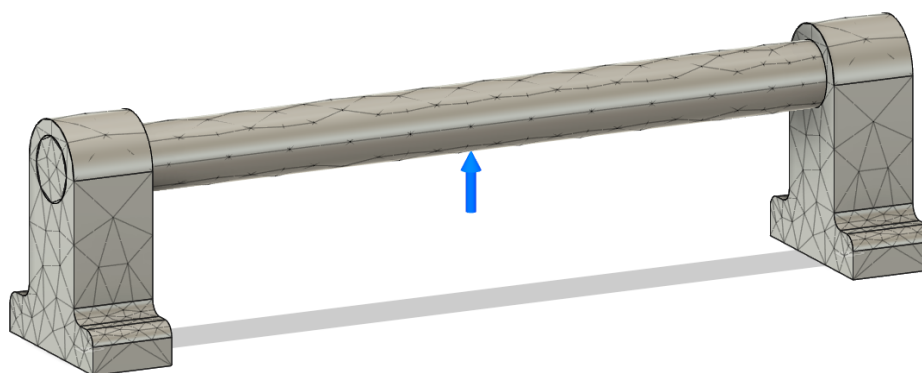


Figura 7 - Cilindro com malhas.

4 - Resultados

Nesta seção, são apresentados e analisados os resultados obtidos por meio da simulação de elementos finitos (MEF) no software Autodesk Fusion 360. Foram realizados ensaios de estresse estático em ambos os modelos — o eixo de transmissão do Honda GL e o cilindro simplificado — sob duas condições de carregamento de torque: 1000 N.m e 1400 N.m. O objetivo é comparar o comportamento estrutural e identificar o impacto das geometrias complexas na distribuição de tensão e na iminência de falha.

4.1 - Análise da Tensão de Von Mises

A Tensão de Von Mises é um valor escalar que permite prever a falha de materiais dúcteis. Os resultados da simulação demonstram uma diferença drástica entre o cilindro liso e o eixo de transmissão real.

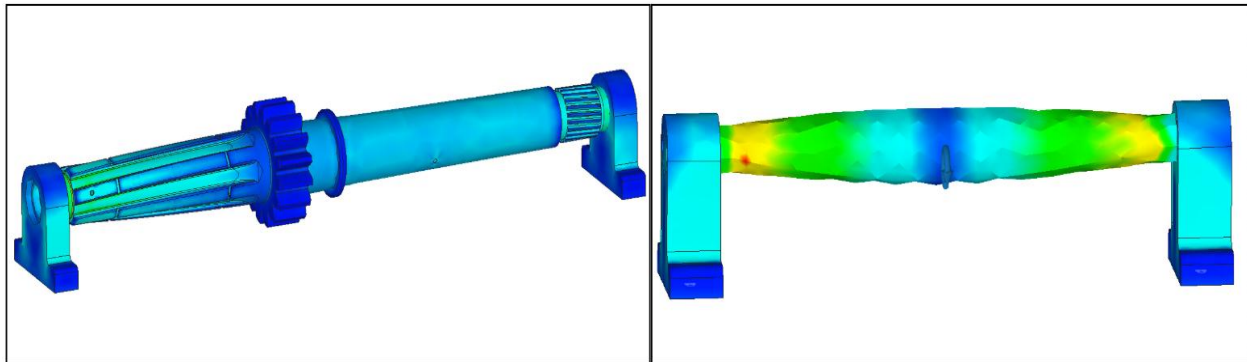


Figura 8 - Imagem da distribuição de tensão no Eixo e Cilindro sob carga de 1400 Nm.

O gráfico comparativo revela que:

No Eixo de Transmissão: Os níveis de tensão são extremamente elevados, atingindo 1474,66 MPa com torque de 1000 Nm e 1500,28 MPa com 1400 Nm. Esses valores, que superam largamente o limite de escoamento e até mesmo o limite de resistência à tração do material (1075 MPa), concentram-se em regiões de variação geométrica, como raios de concordância e a base dos dentes da engrenagem.

No Cilindro Simplificado: A ausência de concentradores de tensão resulta em níveis de estresse significativamente menores. A tensão máxima foi de 326,91 MPa (1000 Nm) e 457,78 MPa (1400 Nm), permanecendo bem abaixo do limite de escoamento do aço SAE 4140.

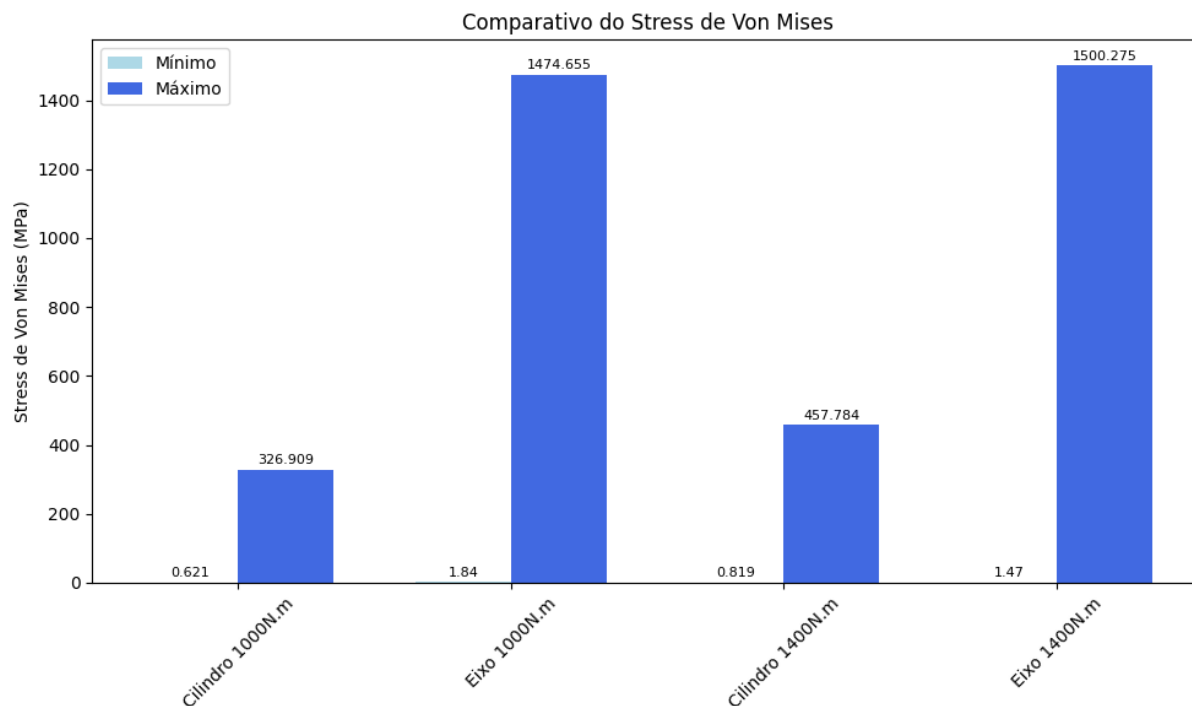


Figura 9 – Comparativo da Tensão de Von Mises.

4.2 - Análise do Fator de Segurança

O Fator de Segurança (FS) indica quão longe o componente está de falhar, sendo calculado com base no limite de escoamento do material. Um FS abaixo de 1.0 indica falha iminente.

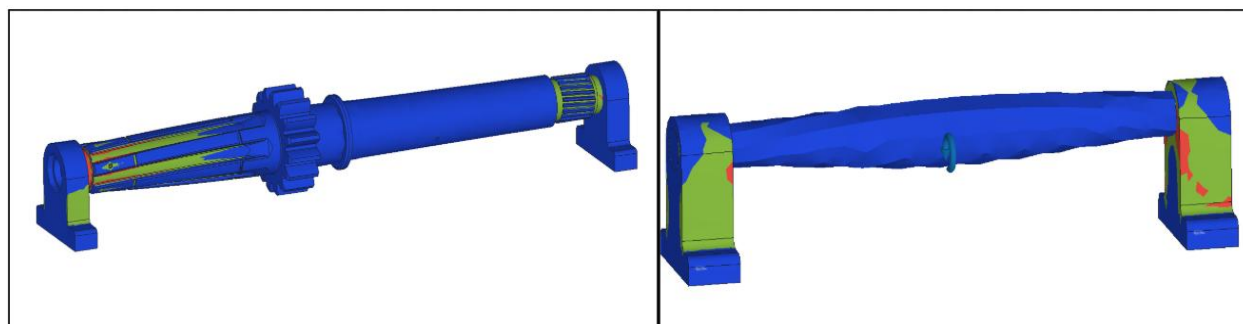


Figura 10 - Imagem do mapa de Fator de Segurança no Eixo e Cilindro sob carga de 1400 Nm.

O gráfico comparativo revela que:

No Eixo de Transmissão: O fator de segurança mínimo foi de **0,7** para o torque de 1000 N.m e 0,689 para 1400 Nm. Ambos os valores, por serem inferiores a 1.0, indicam que o eixo falhará por escoamento plástico sob essas cargas, não suportando a operação.

No Cilindro Simplificado: O fator de segurança permaneceu no valor máximo de **8**, demonstrando que a geometria idealizada suportaria as cargas aplicadas com uma margem de segurança muito alta.

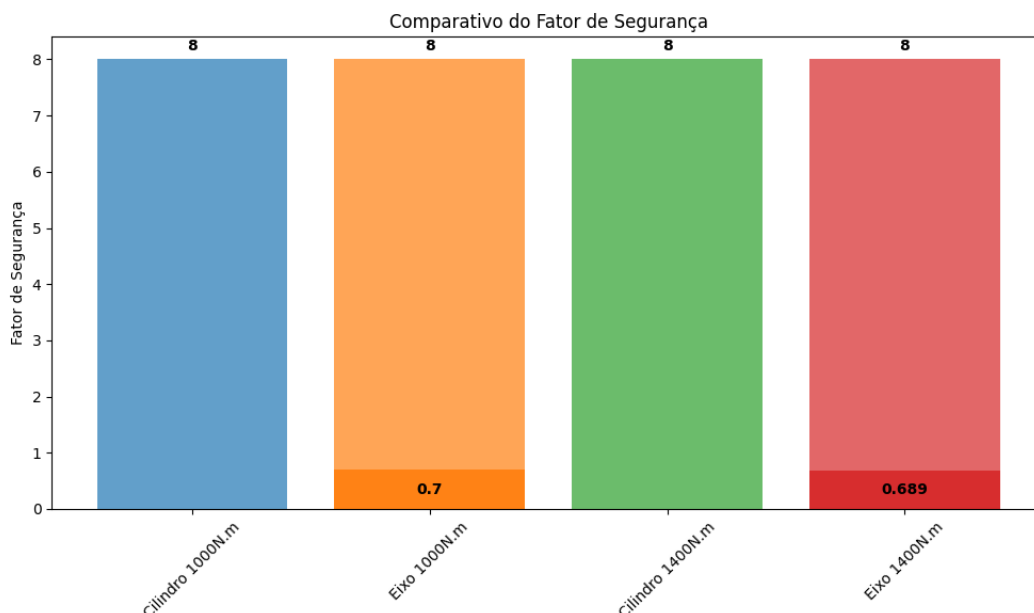


Figura 11 – Comparativo do Fator de Segurança.

4.3 - Análise de Deslocamento e Deformação Equivalente

O deslocamento máximo e a deformação equivalente também são indicadores importantes do comportamento estrutural.

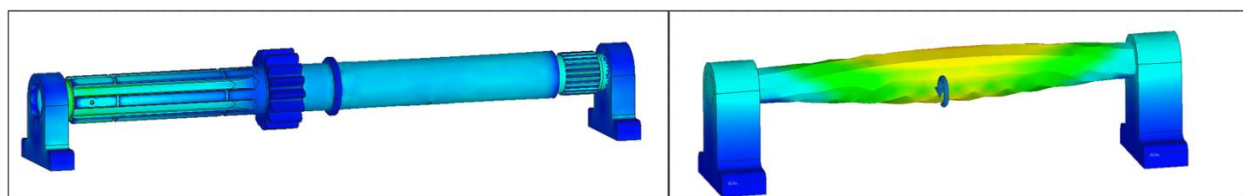


Figura 12 - Imagem do mapa de deslocamento no Eixo e Cilindro sob carga de 1400 Nm.

O gráfico comparativo revela que:

Deslocamento Máximo: O eixo apresentou um deslocamento máximo de 0,88 mm (1000 Nm) e 0,904 mm (1400 Nm), valores cerca de 4 a 5 vezes maiores que os do cilindro (0,18 mm e 0,251 mm, respectivamente).

Deformação Equivalente Máxima: Seguindo a mesma tendência, a deformação no eixo (0,013 e 0,015) foi aproximadamente 4 vezes superior à do cilindro (0,003 e 0,004).

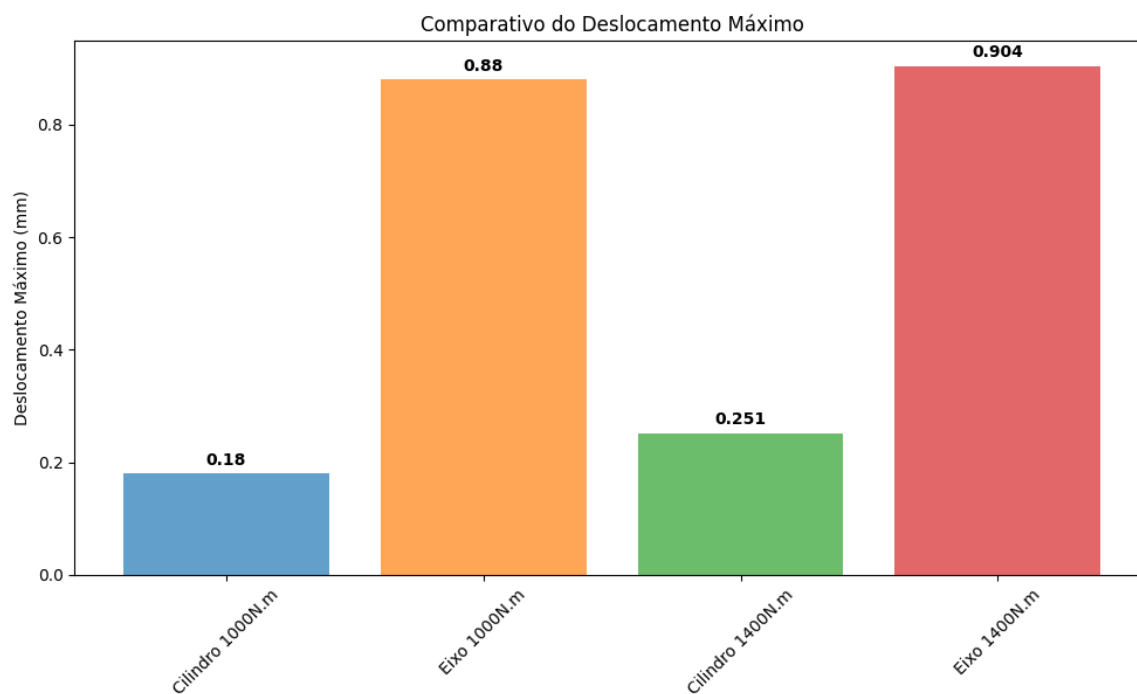


Figura 13 – Comparativo de Deslocamento Máximo.

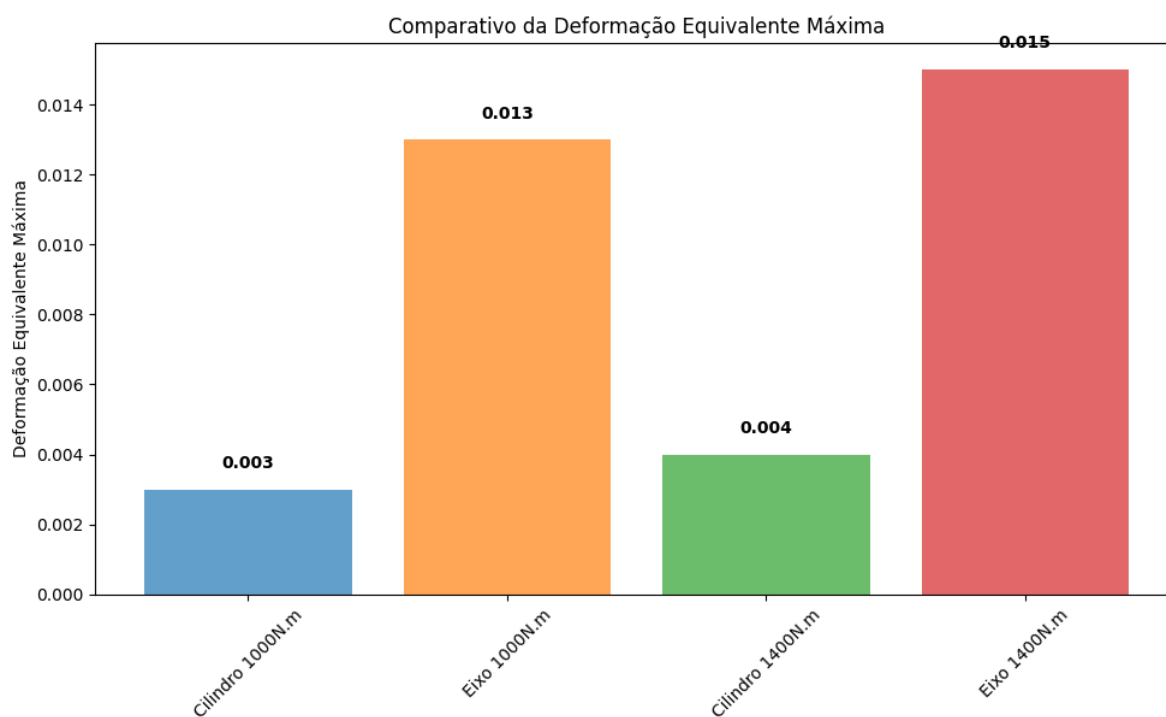


Figura 14 – Comparativo de Deformação Equivalente.

5 – Conclusões

O estudo teve como objetivo investigar as causas de fratura por fadiga em eixos de transmissão automotiva, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) como ferramenta de análise. Por meio da modelagem 3D e da simulação de um eixo do veículo Honda GL em comparação com um cilindro idealizado, foi possível demonstrar de forma conclusiva o papel crítico das geometrias complexas como principal fator de falha.

Os resultados obtidos revelaram que, sob torques de 1000 Nm e 1400 Nm, o eixo de transmissão real apresentou tensões de Von Mises de 1474,66 MPa e 1500,28 MPa, respectivamente. Tais valores excedem drasticamente não apenas o limite de escoamento do aço SAE 4140 (986 MPa), mas também seu limite de resistência à tração (1075 MPa), indicando falha por sobrecarga estática antes mesmo de considerar a fadiga. Em contraste, o cilindro simplificado, sem concentradores de tensão, manteve-se com tensões máximas de 457,78 MPa, bem abaixo do limite de escoamento.

A análise do Fator de Segurança (FS) confirma esses achados, resultando em valores críticos de 0,7 e 0,689 para o eixo de transmissão, o que confirma a falha iminente por escoamento plástico. O cilindro, por sua vez, apresentou um FS de 8, demonstrando total segurança sob as mesmas condições de carregamento. A investigação de deslocamento e deformação também evidenciou a menor rigidez estrutural do eixo real, que se deforma aproximadamente quatro vezes mais que o modelo idealizado.

Conclui-se, portanto, que a principal causa de ruptura em eixos de transmissão não está presente em uma falha intrínseca do material, mas sim no efeito da concentração de tensão provocado por descontinuidades geométricas, como a base dos dentes das engrenagens e raios de concordância. Essas regiões atuam como iniciadoras de trincas que, sob carregamento cíclico, se propagam até a fratura final, caracterizando a falha por fadiga.

A metodologia empregada, utilizando o software Autodesk Fusion 360, mostrou-se eficaz para diagnosticar pontos críticos de falha de forma virtual, validando a aplicação da engenharia assistida por computador (CAE) para a otimização de projetos mecânicos e prevenção de falhas prematuras.

Para trabalhos futuros, sugere-se a análise de otimização geométrica, focada em suavizar os raios nos concentradores de tensão, e a realização de uma simulação de vida em fadiga para estimar o número de ciclos que o componente suportaria após as modificações de projeto.

6 - Referências

AÇO ESPECIAL. Aço SAE 4140. Aço Especial, [s. d.]. Disponível em: <https://www.acoespecial.com.br/aco-sae-4140>. Acesso em: 12 set. 2025.

AÇOS NOBRE. Aço 4140: Propriedades, Preço e Composição Química. Aços Nobre, 10 jul. 2024. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/aco-4140-propriedades-preco-composicao-quimica/>. Acesso em: 12 set. 2025.

AESTEIRON STEELS LLP. SAE 4140 Round Bar Specification and Properties. Aesteiron Steels, 23 nov. 2023. Disponível em: <https://www.aesteiron.com/blog/sae-4140-round-bar-specification-and-properties/>. Acesso em: 12 set. 2025.

ESSS. Método dos Elementos Finitos: o que é e como funciona?. ESSI, [s. d.]. Disponível em: <https://www.esss.com/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 17 set. 2025.

GOMES, Daniel Juste. Análise de falhas de um semi-eixo automotivo por meio de ensaios mecânicos, análise metalográfica e simulação computacional. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: https://bib.pucminas.br/teses/EngMecanica_GomesDJ_1.pdf. Acesso em: 17 set. 2025.

HELIAR. Sistema de transmissão: o que é, como funciona e quais os seus componentes. [S. l.], 19 maio 2021. Disponível em: <https://www.heliar.com/blog/heliar-blog/sistema-de-transmissao>. Acesso em: 17 set. 2025.

LEI de Paris-Erdogan. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2023. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Lei_de_Paris_Erdogan. Acesso em: 20 set. 2025.

LOMONTE, Rodrigo da Silva. Análise de Falha por Fadiga em Parafusos de Roda Automotiva. Relatório Final de Iniciação Científica - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2019/download/relatorios/CTC/DEQM/DEQM-Rodrigo%20da%20Silva%20Lomonte.pdf. Acesso em: 20 set. 2025.

MAIN transmission shaft. [S. l.]: GrabCAD, [s. d.]. Disponível em: <https://grabcad.com/library/main-transmission-shaft-1>. Acesso em: 20 set. 2025.

MEDEIROS, Gianpaulo. Classificação dos Aços. Material Didático de Ciência dos Materiais para Eng. Elétrica. IFSC, [s. d.]. Disponível em: <https://docente.ifsc.edu.br/gianpaulo.medeiros/MaterialDidatico/Ci%C3%Aancia%20dos%20M>

[ateriais%20para%20Eng.%20El%C3%A9trica/Aula%205%20%20Caracteriza%C3%A7%C3%A3o%20dos%20Materiais%20/Classifica%C3%A7%C3%A3o%20dos%20A%C3%A7os.pdf](#).

Acesso em: 21 set. 2025.

MORAWSKI, Alexandre. Análise de falha em fadiga de um eixo de transmissão de um caminhão utilizando os critérios da mecânica da fratura elástico-linear. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

Disponível

em:

https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2013-1_alexandre_morawski_versao_final.pdf. Acesso em: 21 set. 2025.

RAHMOUNI, K. et al. Fatigue failure investigation of a vehicle's transmission shaft based on numerical and experimental analysis. Case Studies in Engineering Failure Analysis, v. 10, 2022.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322018624>.

Acesso em: 24 set. 2025.

RESEARCHGATE. Paris-Erdogan plot showing typical FCG rate (da/dn) behaviour of rubber in.... [S. l.], 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Paris-Erdogan-plot-showing-typical-FCG-rate-da-dn-behaviour-of-rubber-in_fig6_341479081. Acesso em: 24 set. 2025.