

Revista Eletrônica



Volume 5 – Número 1 - 2025

Análise de Falha em Eixos de Transmissão Automotiva: Um Estudo Abrangente sobre o Impacto de Torções Repetitivas e Cargas Súbitas

João Vitor Landmann Pricoli
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
joao.pricoli@aluno.ifsp.edu.br

Resumo

Este artigo apresenta uma investigação aprofundada sobre os mecanismos de ruptura em eixos de transmissão automotiva, componentes críticos para a segurança e funcionalidade veicular. O estudo foca nos dois modos de falha predominantes: a fratura por fadiga, induzida por torções repetitivas e cíclicas, e a fratura por sobrecarga, resultante de cargas súbitas e de alto impacto. A análise é conduzida sob uma perspectiva multidisciplinar, integrando conceitos de engenharia mecânica, metalurgia, ciência dos materiais e análise de falhas. O trabalho detalha os fundamentos de engenharia de eixos, incluindo arquitetura, seleção de materiais e o papel crucial dos tratamentos térmicos. Subsequentemente, explora os mecanismos físicos da fratura, a influência de concentradores de tensão e as distintas morfologias de fratura (dúctil e frágil). São apresentadas as metodologias de diagnóstico, com ênfase na análise fractográfica e em técnicas de inspeção preditiva como ensaios não destrutivos e simulação por elementos finitos. O artigo culmina com um estudo de caso detalhado e a proposição de estratégias de mitigação e prevenção, oferecendo um guia completo para o projeto, fabricação e manutenção de eixos de transmissão mais robustos e confiáveis.

Palavras-chave

Eixo de Transmissão, Análise de Falha, Fadiga de Materiais, Fratura por Sobrecarga, Fractografia, Engenharia Automotiva.

Abstract

This article presents an in-depth investigation into the rupture mechanisms of automotive transmission shafts, components critical to vehicular safety and functionality. The study focuses on the two predominant failure modes: fatigue fracture, induced by repetitive and cyclical torsion, and overload fracture, resulting from sudden, high-impact loads. The analysis is conducted from a multidisciplinary perspective, integrating concepts from mechanical engineering, metallurgy, materials science, and failure analysis. The paper details the fundamentals of shaft engineering, including design architecture, material selection, and the crucial role of heat treatments. Subsequently, it explores the physical mechanisms of

fracture, the influence of stress concentrators, and distinct fracture morphologies (ductile and brittle). Diagnostic methodologies are presented, with an emphasis on fractographic analysis and predictive inspection techniques such as non-destructive testing (NDT) and finite element analysis (FEA). The article culminates with a detailed case study and the proposition of mitigation and prevention strategies, offering a comprehensive guide for the design, manufacturing, and maintenance of more robust and reliable transmission shafts.

Keywords

Transmission Shaft, Failure Analysis, Material Fatigue, Overload Fracture, Fractography, Automotive Engineering.

1 - Introdução

1.1 - Contextualização e Importância Crítica do Eixo de Transmissão

Na complexa arquitetura de um veículo automotivo, o sistema de *powertrain* representa o coração que converte a energia química do combustível em movimento mecânico. Dentro deste sistema, o eixo de transmissão emerge como um dos componentes mais críticos, atuando como a espinha dorsal que transfere o torque e a potência rotacional da caixa de câmbio para o diferencial e, finalmente, para as rodas motrizes. Sua integridade estrutural não é apenas uma questão de funcionalidade; é um pilar fundamental da segurança veicular. Uma falha catastrófica do eixo em serviço resulta na perda imediata de propulsão, podendo levar à perda de controle do veículo e a consequências graves.

As condições operacionais a que este componente é submetido são extremas. Ele deve suportar milhões de ciclos de torção de amplitude variável, decorrentes das flutuações de torque do motor, trocas de marcha e variações na resistência ao rolamento. Adicionalmente, eventos de condução não rotineiros, como acelerações bruscas, impactos com buracos ou o engate abrupto da embreagem, impõem cargas de choque súbitas e de alta magnitude que podem exceder a resistência do material.

1.2 - Definição do Problema: Fadiga vs. Sobrecarga

A falha de um eixo de transmissão raramente é um evento aleatório. Ela é governada por mecanismos de fratura bem definidos, que podem ser categorizados em dois grupos principais:

Falha por Fadiga: É um processo de fratura progressivo e localizado, causado por tensões e deformações cíclicas. Este é o modo de falha mais comum em componentes rotativos e o mais insidioso, pois ocorre em níveis de tensão nominais muito inferiores à resistência do material, sem aviso prévio de deformação macroscópica.

Fratura por Sobrecarga: Resulta de um único evento de carregamento de alta magnitude que excede a resistência intrínseca do material, causando uma falha imediata e, muitas vezes, catastrófica.

Compreender a distinção entre esses dois mecanismos é crucial, pois as estratégias para preveni-los são fundamentalmente diferentes. A prevenção da fadiga foca no gerenciamento de tensões locais e na qualidade superficial, enquanto a prevenção da sobrecarga se concentra na tenacidade e na capacidade de absorção de energia do material.

1.3 - Objetivos e Estrutura do Artigo

O presente artigo tem como objetivo principal realizar uma análise técnica e aprofundada dos mecanismos de ruptura de eixos de transmissão automotiva, com foco nas falhas por torções repetitivas (fadiga) e cargas súbitas (sobrecarga). Para tal, a estrutura do documento foi organizada de forma a construir o conhecimento de maneira progressiva e lógica.

A Seção 2 estabelece os fundamentos de engenharia, abordando a arquitetura do componente, a metalurgia dos aços empregados e o papel dos tratamentos térmicos. A Seção 3 aprofunda-se nos mecanismos físicos da fratura, explicando os estágios da fadiga e os modos de fratura por sobrecarga. A Seção 4 é dedicada às metodologias de diagnóstico e análise de falhas, detalhando a ciência da fractografia e as ferramentas preditivas modernas. A Seção 5 apresenta um estudo de caso prático, aplicando os conceitos discutidos na análise de uma falha real. A Seção 6 consolida o conhecimento em estratégias de mitigação e prevenção. Finalmente, as Seções 7 e 8 apresentam as conclusões e considerações finais, sintetizando os principais aprendizados e apontando para futuras direções.

2 - Fundamentos de Engenharia de Eixos de Transmissão

A concepção de um eixo de transmissão robusto e confiável exige um profundo entendimento de sua função, da seleção criteriosa de materiais e da aplicação precisa de processos de fabricação.

2.1 - Arquitetura e Função no Sistema de *Powertrain*

O eixo de transmissão atua como o elo mecânico rotativo que transporta o torque através de distâncias que não podem ser cobertas por um acoplamento direto. Sua função primordial é conectar a saída da caixa de câmbio ao diferencial (eixo propulsor) ou o diferencial às rodas (semieixos). A arquitetura varia conforme o veículo:

Eixo Inteiroço (*One-Piece Driveshaft*): Configuração mais simples, comum em veículos com entre-eixos curtos. Consiste em um único tubo ou barra sólida, minimizando componentes e pontos de falha.

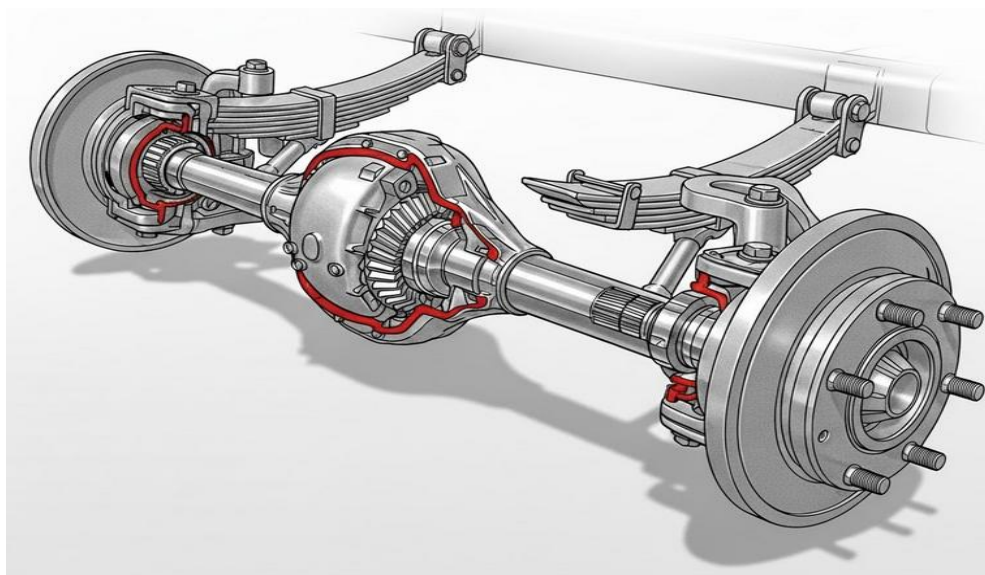


Figura 1 – Eixo inteiriço.

Eixo Bipartido (*Two-Piece Driveshaft*): Usado em veículos longos para evitar o fenômeno de ressonância conhecido como "chicoteamento" (*whirling*), que ocorre quando a velocidade de rotação se aproxima da frequência natural de flexão de um eixo longo. Ao dividir o eixo, a frequência natural de cada seção é elevada, garantindo uma operação mais segura.

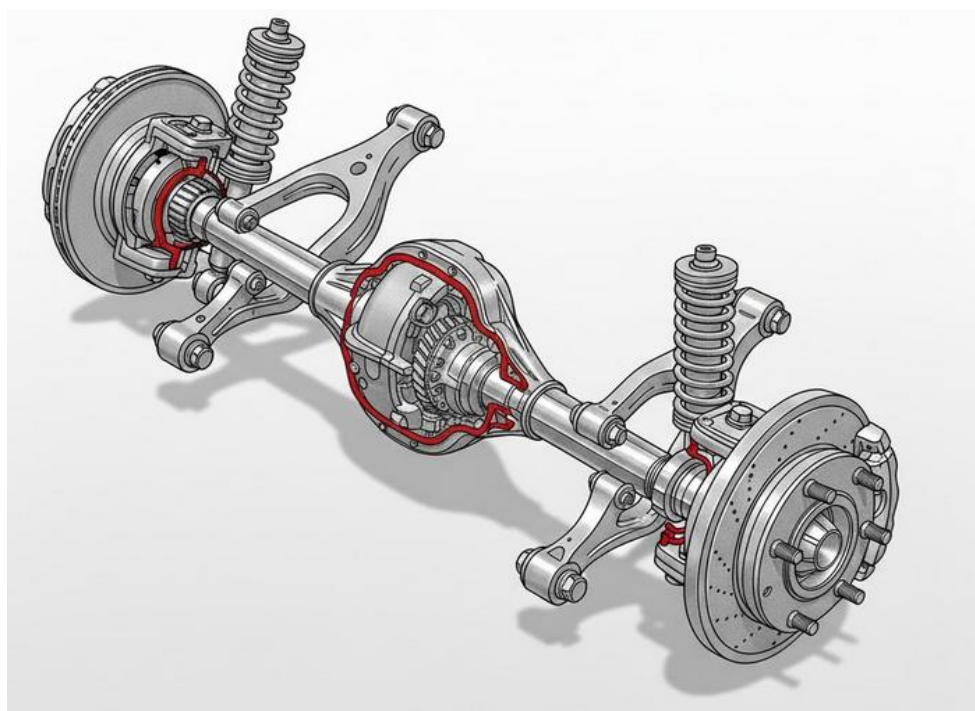


Figura 2 – Eixo Bipartido.

Eixo Deslizante em Tubo (*Slip-in-Tube Driveshaft*): Projeto focado na segurança passiva, com uma construção telescópica que permite o colapso controlado durante uma colisão, absorvendo energia e protegendo o compartimento de passageiros.

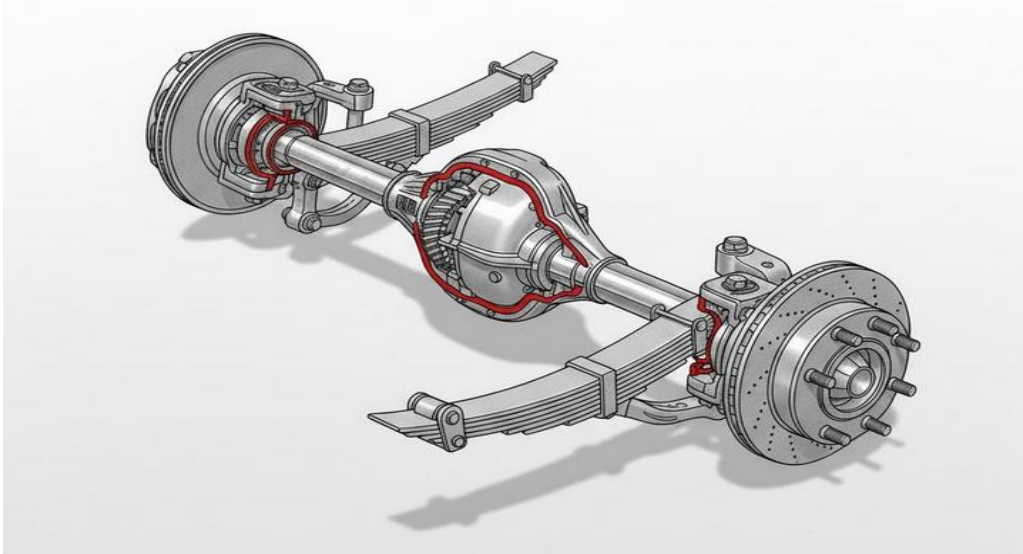


Figura 3 – Eixo deslizante.

Para acomodar os movimentos da suspensão, são utilizadas juntas flexíveis. As juntas universais (cardan) permitem a transmissão de torque entre eixos em ângulos variáveis, enquanto as juntas homocinéticas (CV) são empregadas para transmitir torque em ângulos maiores e a uma velocidade constante, essencial para o conforto e dirigibilidade.

2.2 - Metalurgia Aplicada a Eixos de Transmissão

A seleção do material é um dos fatores mais críticos. O material deve possuir alta resistência mecânica, alta tenacidade, dureza superficial e, crucialmente, uma elevada resistência à fadiga. Aços-carbono de média liga são predominantemente utilizados, com destaque para o SAE 4140 (cromo-molibdênio) e o SAE 4340 (cromo-níquel-molibdênio), conhecidos por sua excelente combinação de propriedades após o tratamento térmico.

O desempenho desses aços é controlado pela sua microestrutura, que é manipulada pela composição química e pelo tratamento térmico. O diagrama de equilíbrio Ferro-Cementita (Fe-Fe₃C) é a ferramenta fundamental para entender essas transformações. As fases e microconstituintes relevantes são:

Ferrita (α): Fase mole e dútil, confere tenacidade ao aço.

Cementita (Fe_3C): Composto intermetálico extremamente duro e frágil, responsável pela resistência ao desgaste.

Perlita: Microconstituente lamelar de ferrita e cementita, com propriedades mecânicas intermediárias, oferecendo um balanço entre resistência e tenacidade.

Austenita (γ): Fase estável em altas temperaturas, a partir da qual as outras microestruturas se formam durante o resfriamento.

Os elementos de liga (Cr, Mo, Ni) aumentam a temperabilidade do aço, que é a capacidade de formar martensita (uma microestrutura muito dura) em profundidade durante o resfriamento rápido, permitindo que mesmo o núcleo de uma peça espessa seja endurecido.

Tabela 1: Comparativo de Aços-Liga para Eixos de Transmissão.

Grau do Aço (SAE/AISI)	Composição Química Chave (% em peso)	Propriedades Mecânicas Chave	Aplicações Típicas em Eixos
SAE 4140	C: 0.38-0.43, Cr: 0.8-1.1, Mo: 0.15-0.25	Boa resistência, alta tenacidade, boa resistência ao desgaste, alta temperabilidade.	Eixos de transmissão, virabrequins, eixos hidráulicos.
SAE 4340	C: ~0.40, Cr: 0.7-0.9, Ni: 1.65-2.0, Mo: 0.2-0.3	Excelente tenacidade, alta resistência, ultra-alta resistência à fadiga.	Eixos de alta performance, componentes aeroespaciais, eixos sujeitos a altos impactos.
SAE 8620	C: 0.18-0.23, Cr: 0.4-0.6, Ni: 0.4-0.7, Mo: 0.15-0.25	Superfície de alta dureza, núcleo tenaz e dúctil.	Engrenagens, pinhões, eixos que requerem extrema dureza superficial.
SAE 8640	C: 0.38-0.43, Cr: 0.4-0.6, Ni: 0.4-0.7, Mo: 0.15-0.25	Alta tenacidade, boa resistência mecânica.	Eixos hidráulicos, cilindros, componentes de máquinas pesadas.

2.3 - O Papel dos Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos ativam o potencial das ligas de aço, ajustando suas propriedades mecânicas através de ciclos de aquecimento e resfriamento.

Têmpera e Revenimento (Beneficiamento): O eixo é aquecido para formar austenita e depois resfriado bruscamente (têmpera) para formar martensita, uma fase extremamente dura, mas frágil.

O reaquecimento a uma temperatura mais baixa (revenimento) alivia as tensões e aumenta a tenacidade, resultando em uma microestrutura ideal para o núcleo do eixo.

Endurecimento Superficial por Indução: A superfície do eixo é aquecida rapidamente por um campo eletromagnético e resfriada por um jato de líquido.

Isso cria uma fina camada superficial de martensita de alta dureza, enquanto o núcleo mantém sua tenacidade. Este processo cria um gradiente de propriedades ideal: uma superfície dura que resiste à

iniciação de trincas de fadiga e um núcleo tenaz que absorve energia de impacto.

Cementação: Usado em aços de baixo carbono, este processo termoquímico difunde carbono na superfície da peça. Após a têmpera, a superfície de alto carbono torna-se extremamente dura, enquanto o núcleo de baixo carbono permanece dúctil.

3 - Mecanismos de Fratura em Eixos de Transmissão

A falha de um eixo é o resultado final de um processo de degradação do material, governado por mecanismos de fratura bem definidos.

3.1 - Falha por Fadiga sob Torções Repetitivas

A fadiga é o mecanismo de falha predominante em eixos de transmissão. Ela ocorre em três estágios distintos:

Estágio I - Iniciação da Trinca: Microtrincas nucleiam em locais de alta concentração de tensão na superfície do componente, como entalhes, raios de concordância ou defeitos de usinagem. Este estágio pode consumir até 90% da vida útil do componente.

Estágio II - Propagação da Trinca: A microtrinca cresce de forma estável a cada ciclo de carga, perpendicularmente à direção da tensão de tração máxima.

Estágio III - Fratura Final: A trinca reduz a área da seção transversal resistente até que a seção remanescente não consiga mais suportar a carga, resultando em uma fratura instantânea por sobrecarga.

3.1.2 - A Influência Crítica dos Concentradores de Tensão

A iniciação da fadiga está intrinsecamente ligada à presença de concentradores de tensão — descontinuidades geométricas que amplificam a tensão localmente.

Em eixos, eles incluem mudanças de diâmetro, raios de concordância, rasgos de chaveta e estrias. A magnitude da amplificação é quantificada pelo Fator de Concentração de Tensão Teórico (K_t):

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (1)$$

Onde: σ_{max} é a tensão máxima real na raiz do entalhe e σ_{nom} é a tensão nominal. Um raio de concordância menor resulta em um K_t maior, tornando-o um local preferencial para a nucleação de trincas.

A durabilidade de um eixo é, portanto, mais uma função do controle rigoroso da geometria local do que da resistência do material.

3.2 - Fratura por Sobrecarga (Impacto)

A fratura por sobrecarga é resultado de um único evento de carregamento que excede a resistência do material.

Fratura Dúctil: Característica de materiais tenazes, é precedida por deformação plástica visível (torção, estricção). A superfície da fratura é opaca e fibrosa. Microscopicamente, a análise por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) revela "dimples" (covinhas), que são a marca registrada da coalescência de microvazios.

Fratura Frágil: Ocorre com pouca ou nenhuma deformação plástica, sendo súbita e imprevisível. A superfície é plana, brilhante e cristalina, frequentemente exibindo "padrões de rio" ou "chevrons" que apontam para a origem da fratura. Microscopicamente, ocorre por clivagem, a separação do material ao longo de planos cristalográficos.

A Transição Dúctil-Frágil: Aços inerentemente dúcteis podem se comportar de maneira frágil em baixas temperaturas ou sob altas taxas de carregamento (impacto). A prevenção visa garantir que, se a sobrecarga ocorrer, a falha seja dúctil, pois absorve mais energia e fornece um aviso prévio.

4 - Metodologias de Análise de Falhas

A determinação da causa raiz da falha é um processo investigativo que combina múltiplas técnicas.

4.1 - Procedimentos Sistemáticos de Investigação

Uma análise de falha eficaz segue um protocolo estruturado:

Coleta de Informações: Reúne-se o histórico de serviço do componente, condições operacionais, registros de manutenção e especificações de projeto.

Exame Visual Preliminar: Inspeção detalhada da peça fraturada, documentando com fotografias e anotações antes de qualquer limpeza ou corte.

Ensaio Não Destrutivo (END): Aplicação de técnicas como Partículas Magnéticas ou Ultrassom para identificar defeitos superficiais ou internos sem danificar a peça.

Análise Fractográfica: Estudo detalhado da superfície de fratura para determinar o modo e a origem da falha.

Análise Metalúrgica: Preparação de amostras para análise microscópica da microestrutura, ensaios de dureza e análise de composição química.

Análise Final e Relatório: Consolidação de todos os dados para determinar a causa raiz e elaborar um relatório com conclusões e recomendações.

4.2 - Análise Fractográfica: A Decodificação da Superfície de Fratura

A fractografia é o estudo das superfícies de fratura para determinar a causa da falha. Este tipo de análise decodifica a "história" da falha ao examinar os padrões, texturas e marcas topográficas deixadas na superfície rompida. Ela opera em duas escalas principais: a macroscópica, visível a olho nu, que pode revelar a origem geral e o caminho principal da fratura, e a microscópica. Na escala micro, frequentemente utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), é possível identificar os mecanismos finos, como estrias de fadiga ou microvazios, que governaram a separação do material.

O objetivo principal da fractografia é, portanto, identificar o modo e o mecanismo de fratura, distinguindo se a falha foi dúctil (com deformação plástica) ou frágil (súbita e com pouca deformação). Ela permite localizar o ponto exato de início da trinca (o "epicentro" da falha) e traçar a direção de sua propagação através do componente. Essas informações são cruciais não apenas para entender o evento de falha específico, mas também para implementar ações corretivas e prevenir futuras ocorrências.

4.2.1 - Análise Macroscópica: Realizada a olho nu ou com baixa ampliação.

Fadiga: A superfície exibe marcas de praia (*beach marks*), linhas curvas que se irradiam da origem da trinca e indicam a progressão da falha. A região de fadiga é lisa, contrastando com a zona de fratura final, que é áspera.

Sobrecarga: Distingue-se entre fratura dúctil (com deformação plástica) e frágil (limpa, com possíveis padrões de chevron).

4.2.2 - Análise Microscópica (MEV): Utiliza um Microscópio Eletrônico de Varredura para Examinar a Topografia em Alta Magnificação.

Fadiga: A assinatura definitiva são as estrias, linhas finas onde cada uma representa o avanço da trinca durante um único ciclo de carga.

Sobrecarga Dúctil: Caracterizada por dimples (microvazios coalescidos).

Sobrecarga Frágil: Exibe facetas de clivagem, regiões planas e cristalinas.

4.3 - Ensaios Não Destrutivos (END)

ENDs avaliam a integridade de um componente sem causar danos, sendo essenciais para o controle de qualidade e manutenção preditiva.

Inspeção por Partículas Magnéticas (MT): Detecta discontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos, como trincas de fadiga.

Inspeção por Ultrassom (UT): Utiliza ondas sonoras de alta frequência para detectar defeitos internos como inclusões ou trincas.

4.4 - Simulação Computacional (Análise por Elementos Finitos - FEA)

A FEA é uma ferramenta de simulação usada no projeto para prever o comportamento mecânico de um componente.

Análise de Tensão: A FEA visualiza a distribuição de tensões, identificando "pontos quentes" de máxima concentração de tensão, que são os locais prováveis para a iniciação de falhas.

Previsão de Vida em Fadiga: Módulos de FEA, como no software Ansys, utilizam os resultados da análise de tensão e as propriedades do material para estimar a vida útil do componente em número de ciclos.

5 - Estudo de Caso: Análise de Falha de um Semieixo Automotivo

Para ilustrar a aplicação prática das metodologias descritas, esta seção detalha uma análise de falha hipotética, mas realista, de um semieixo de um veículo comercial leve.

5.1 - Contextualização do Caso

Um semieixo de um veículo utilitário, com aproximadamente 80.000 km de uso, fraturou em serviço sem aviso prévio, resultando na imobilização do veículo. O componente falhou na região do raio de concordância (filete) que conecta o corpo do eixo ao flange de acoplamento da roda.

5.2 - Coleta de Dados e Histórico de Serviço

A investigação inicial revelou que o veículo operava frequentemente próximo ao seu limite de carga e em rotas com pavimentação irregular. Os registros de manutenção não indicavam intervenções prévias no sistema de transmissão, e o operador não relatou vibrações ou ruídos anormais antes da falha.

5.3 - Análise Visual e Macroscópica

A inspeção visual da superfície de fratura revelou características clássicas de uma falha por fadiga. A superfície era predominantemente plana e perpendicular ao eixo. Marcas de praia bem definidas eram visíveis a olho nu, irradiando de um único ponto de origem na superfície, localizado exatamente na raiz do filete. Uma pequena zona final, com aparência áspera e granular, indicava a fratura por sobrecarga da seção remanescente. Nenhuma deformação plástica macroscópica, como torção, foi observada no corpo do eixo.

5.4 - Análise Fractográfica (MEV)

A análise por MEV confirmou o diagnóstico inicial. Na região de origem, foram observadas múltiplas microtrincas e o início da propagação.

Afastando-se da origem, estrias de fadiga finas e paralelas eram claramente visíveis, confirmando o mecanismo de propagação ciclo a ciclo.

O espaçamento das estrias aumentava progressivamente, indicando a aceleração da propagação da trinca. A zona de fratura final exibia uma morfologia de *dimples*, característica de uma sobrecarga dúctil da seção remanescente.

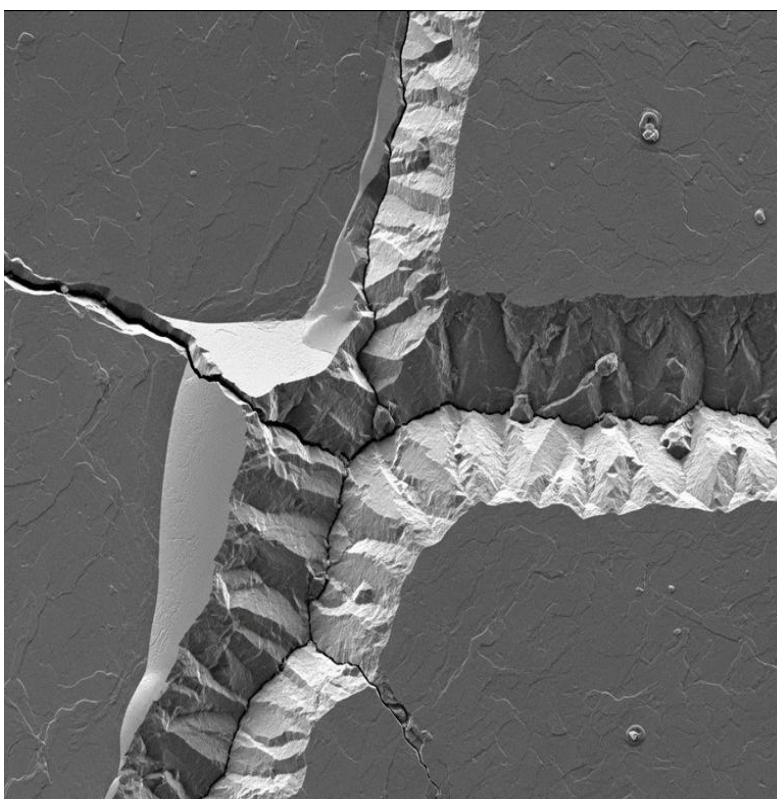


Figura 4 – Análise fractográfica do ponto de ruptura.

5.5 - Análise Metalúrgica e de Dureza

A análise química por espectrometria confirmou que o material era um aço SAE 4140, conforme especificado no projeto.

Ensaio de microdureza revelaram um perfil adequado, com uma superfície endurecida por indução e um núcleo mais tenaz. No entanto, uma medição precisa da geometria do filete na região da fratura, utilizando um perfilômetro óptico, revelou que o raio de concordância era de 1,6 mm, enquanto a especificação de projeto era de 2,5 mm.

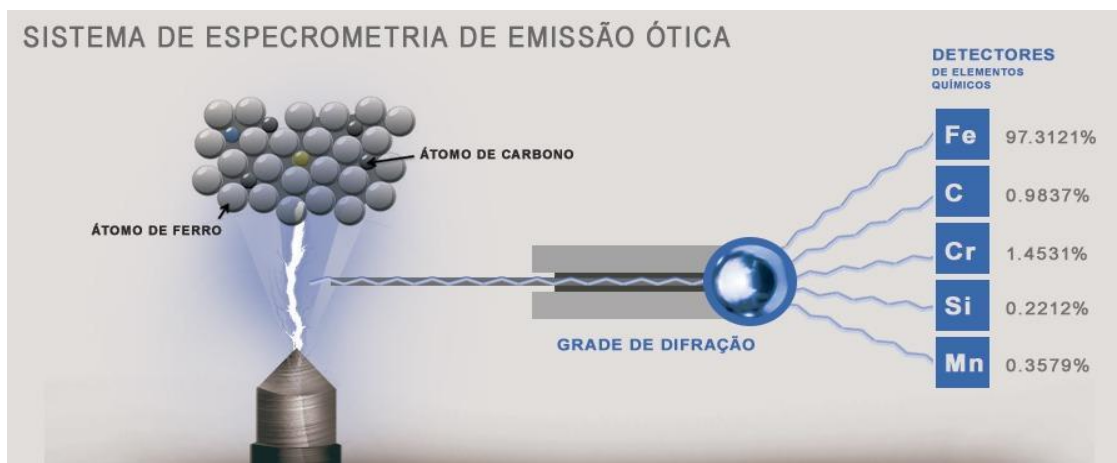


Figura 5 – Espectrometria (Imagem meramente ilustrativa).

5.6 - Simulação por Elementos Finitos (FEA) do Componente

Dois modelos de FEA foram criados: um com o raio de filete especificado (2,5 mm) e outro com o raio medido (1,6 mm). Sob as cargas de torção e flexão nominais de serviço, a simulação mostrou que o raio de 1,6 mm resultava em uma concentração de tensão 40% maior na raiz do filete em comparação com o raio de projeto. Esta tensão amplificada excedia o limite de resistência à fadiga do material naquela região, explicando a iniciação da trinca.

5.7 - Conclusões do Estudo de Caso

A análise de falha concluiu que a causa raiz da fratura foi fadiga por flexo-torção, iniciada em um concentrador de tensão. O fator determinante foi um defeito de fabricação: a usinagem de um raio de concordância menor do que o especificado no projeto. Este desvio geométrico amplificou as tensões de serviço a um nível que iniciou uma trinca de fadiga, que se propagou até a falha final do componente.

6 - Estratégias de Prevenção e Mitigação de Falhas

A confiabilidade de um eixo de transmissão é alcançada através de uma abordagem integrada que otimiza projeto, materiais, fabricação e manutenção.

6.1 - Otimização de Projeto Geométrico

A principal estratégia para aumentar a resistência à fadiga é a minimização dos concentradores de tensão. Isso é alcançado através de:

Raios de Concordância Generosos: Um pequeno aumento no raio de um filete pode aumentar drasticamente a vida em fadiga.

Acabamento Superficial de Alta Qualidade: Processos como retificação ou polimento em áreas críticas removem micro-entalhes que podem nuclear trincas.

6.2 - Seleção de Materiais e Tratamentos Térmicos

A escolha de materiais deve ser guiada pela tenacidade e resistência à fadiga. A conformidade com normas da indústria, como a SAE J901, fornece diretrizes essenciais para o projeto e aplicação de eixos de transmissão. A aplicação correta de tratamentos térmicos é fundamental para criar o gradiente de propriedades desejado entre a superfície e o núcleo.

6.3 - Tratamentos Superficiais para Aumento da Resistência à Fadiga

O Shot Peening é um processo de trabalho a frio onde a superfície é bombardeada com pequenas esferas, induzindo uma camada de altas tensões residuais de compressão. Como a fadiga é impulsionada por tensões de tração, essa camada compressiva atua como uma barreira protetora, aumentando significativamente a vida útil do componente.

6.4 - Controle de Qualidade e Manutenção Preditiva

Inspeção Regular: A verificação periódica de todo o sistema de transmissão, incluindo juntas e rolamentos, é crucial para detectar desalinhamentos ou desgastes que possam induzir cargas anormais no eixo.

Identificação de Sinais de Alerta: Operadores devem ser treinados para reconhecer vibrações, ruídos anormais (estalos) ou vazamentos de graxa, que são sintomas de problemas iminentes.

Análise de Falhas como Melhoria Contínua: Toda falha em campo deve ser rigorosamente analisada para realimentar o ciclo de projeto e prevenir a recorrência do problema.

7 - Conclusões

A investigação da ruptura de eixos de transmissão automotiva demonstra que a falha deste componente é um problema multifatorial, situado na interseção entre as cargas de serviço, o projeto geométrico e as propriedades do material. A análise distinguiu claramente os dois principais mecanismos de falha:

A fadiga, um processo progressivo iniciado em concentradores de tensão, é melhor prevenida através do gerenciamento de tensões locais por meio de um projeto geométrico otimizado e da introdução de tensões residuais compressivas benéficas.

A fratura por sobrecarga, um evento de alta energia, é mitigada pela seleção de materiais com

alta tenacidade e tratamentos térmicos que garantam um comportamento de falha dúctil e seguro.

A análise fractográfica, combinada com simulações computacionais e ensaios não destrutivos, constitui um arsenal poderoso para o diagnóstico preciso da causa raiz. Em última análise, a confiabilidade de um eixo de transmissão não reside em um único fator, mas na sinergia entre um projeto inteligente, materiais adequados, processos de fabricação controlados e uma manutenção proativa.

8 - Considerações Finais

O avanço contínuo da indústria automotiva, especialmente com a transição para veículos elétricos, introduz novos perfis de carregamento nos sistemas de transmissão. Os motores elétricos entregam torque instantâneo, o que pode alterar significativamente os ciclos de fadiga a que os eixos são submetidos. Futuras pesquisas devem se concentrar na caracterização desses novos perfis de carga e no desenvolvimento de materiais e projetos de eixos otimizados para as demandas da eletrificação veicular. A integração de sensores e monitoramento em tempo real (manutenção 4.0) também representa uma fronteira promissora para a detecção precoce de danos por fadiga, elevando ainda mais os padrões de segurança e confiabilidade.

9 - Referências Bibliográficas

- ASM International. (2002). *ASM Handbook, Volume 11: Failure Analysis and Prevention*.
- Budynas, R., & Nisbett, J. K. (2016). *Elementos de Máquinas de Shigley*. AMGH Editora.
- Collins, J. A. (s.d.). *Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas – Uma Perspectiva de Prevenção da Falha*.
- Dekmake. (s.d.). *Veios de transmissão: um guia completo*.
- Induterm. (s.d.). *Têmpera por indução*.
- Lessa, G. J. P. (2020). *Análise de Falhas Mais Comuns em Eixos de Equipamentos Industriais*.
- NeoNickel. (s.d.). *Optimising automotive drive shafts for speed, reliability and safety*.
- Norton, R. L. (2013). *Projeto de Máquinas*. Bookman Editora.
- Repositório Anima Educação. (s.d.). *Estudo de caso comparativo de vida em fadiga em eixo interconector de semi-eixo automotivo*.
- Repositório UNESP. (s.d.). *Análises de Falhas em Eixo de Laminadora*.
- Sacchelli. (s.d.). *Quais os tipos de aço para eixos?*.
- SAE International. (2007). *SAE J901: Universal Joints and Driveshafts—Nomenclature—Terminology—Application*.
- Silva, F. A., Chaves, C. A., & Guidi, E. S. (2016). *Análise de falha por fadiga em eixo de transmissão*.

utilizando o método dos elementos finitos. *Exacta*, 14(2), 207-219.

Technorm. (s.d.). *Fatigue Failure of a Drive Shaft*.

VTM Balancing. (2022). *Análise de falhas nos componentes do eixo de transmissão*.

Palit, P., Kanrar, S., & outros. (2021). *Revamping shaft design for combating fatigue failure*. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 21(2), 405–415. Springer.

Huang, K., Li, J. W., & Cao, H. (2012). *Fatigue life prediction of vehicle transmission shaft assembly without intermediate support*. *Applied Mechanics and Materials*, 246–247, 108–112. Trans Tech Publications.