

ANÁLISE DE FRATURA EM UM ENTALHE DE CHAVETA NA CAIXA DE TRANSMISSÃO DE UM VEÍCULO OFF ROAD

Italo Isaac Pereira Do Nascimento Prearo¹, Francisco Edson Nogueira Fraga²

¹ Aluno, Bal. Ciência e Tecnologia, Centro C. Exatas e Naturais, Ufersa. italo.prearo@alunos.ufersa.edu.br

² Professor Orientador, Eng. Mecânica, Centro de Engenharias, Ufersa. E-mail: nfraga@ufersa.edu.br

Resumo: Neste trabalho, realizou-se uma investigação sobre a causa da trinca no rasgo de chaveta da coroa do segundo par de engrenagens cilíndricas de dentes retos da caixa de redução do veículo. A trinca foi identificada durante o processo de inspeção do mecanismo. Para isso, foram levantados os principais motivos que poderiam ter ocasionado o problema. Utilizou-se a Árvore de Análise de Falha (FTA), uma metodologia empregada para a definição de eventos que possam causar a falha de um mecanismo, a fim de auxiliar na detecção da origem da trinca. Por fim, realizou-se uma análise utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para observar o perfil da superfície da trinca, com o intuito de assimilar as características da superfície fraturada com os tipos de falhas mecânicas. Constatou-se que a falha se deu por fadiga, sendo a mudança brusca de diâmetros a principal agravante para esse evento. Com a descoberta da causa da falha, almeja-se aumentar a confiabilidade do projeto, realizando a mudança geométrica do componente.

Palavras-chave: Falha. FTA. MEV.

1. INTRODUÇÃO

Entre as causas de acidentes de trânsito, a falha mecânica apresenta uma parcela significativa de contribuição, totalizando 3.151 acidentes, conforme indicado pelo último Atlas de Acidentalidade no Transporte Brasileiro publicado em 2021 [1]. Essas falhas podem ter sido ocasionadas por falta de manutenção, mau uso, fim da vida útil ou dimensionamento inadequado das peças para temperatura de trabalho ou esforços atuantes. A ABNT 5462 caracteriza falha como o término da capacidade de um item para sua função requerida. Falha é um evento, diferentemente de pane, que é um estado [2]. Quando eventos como esses ocorrem, é indicado um estudo de causa raiz, cujo objetivo, segundo [3], é descobrir por que ocorreu e o que fazer para prevenir a recorrência do problema.

Para avaliar melhor as razões das falhas, análises fractográficas, por meio da observação das particularidades da degradação, como a posição, geometria da trinca e coloração, podem fornecer informações sobre as condições em que a fratura ocorreu [4]. Essa técnica pode ser realizada por meio de lupas, microscópios convencionais, microscópios eletrônicos de transmissão e microscópios eletrônicos de varredura, sendo este último possuidor de maior capacidade de ampliação e resolução em comparação aos demais, permitindo a observação de um maior número de detalhes no local da fratura.

A investigação do motivo da falha contribui para o aumento da confiabilidade na execução de novos projetos, desenvolvendo um modelo de aprendizado contínuo que fortalece as áreas vulneráveis, melhora a seleção de materiais, geometria e métodos de fabricação, resultando em mecanismos de maior qualidade e vida útil, além de proporcionar menores custos com manutenções e reparos. Devido ao alto custo que uma caixa de transmissão representa no desenvolvimento de um protótipo Off Road, é essencial que os mecanismos que compõem esse sistema tenham uma vida útil o mais longa possível. Portanto, essa análise contribuirá para o aprimoramento do projeto, tendo como objetivo avaliar os eventos que ocasionaram a falha em uma das engrenagens da caixa de transmissão, prevenindo a ocorrência de eventos semelhantes no futuro.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Projeto Baja SAE

O projeto Baja SAE é um desafio proposto a estudantes de engenharia, cuja missão consiste em desenvolver um protótipo de veículo off-road. Os participantes têm a oportunidade de aplicar os conhecimentos teóricos adquiridos em sala de aula, respeitando as regras do Regulamento Administrativo e Técnico do Baja SAE Brasil (RATA emenda_05). O regulamento impõe restrições quanto aos mecanismos utilizados na concepção do veículo, como as dimensões do chassi, o tipo de freio e, principalmente, a padronização dos motores. No entanto é livre o projeto de subsistemas como direção, suspensão e transmissão (*powertrain*).

2.1.1 Sistema de Transmissões

A função principal dos sistemas de transmissão nos automóveis é transmitir o rpm fornecido pelo motor, de modo a fornecer às rodas a quantidade necessária para movimentar o veículo. Comumente, esse processo é realizado por meio de caixas de transmissão compostas por engrenagens, correntes ou correias. Nestes sistemas, são utilizadas relações para aumentar ou diminuir o torque final, respeitando a equação 01.

$$\text{Torque final} = \text{Relação} \times \text{Torque inicial} \quad \text{Eq. 01}$$

2.1.2 O Sistema de Transmissão por Engrenagens de veículos Off Road.

O subsistema de Powertrain, seção do veículo em que este trabalho foi desenvolvido, tem como objetivo transmitir o torque proveniente do motor para as rodas do veículo. Para isso, são utilizados mecanismos de transmissão, ampliando esse torque e proporcionando força suficiente para que o veículo possa locomover-se e transpor obstáculos off-road.

O processo de ampliação de torque ocorre em dois estágios. Primeiramente, por meio de uma Transmissão Continuamente Variável (CVT), composta por uma polia motora e outra movida, ambas variando o diâmetro de abraçamento que atua sobre a correia que as conecta. Essa variação ocorre automaticamente, influenciada pelas forças mecânicas provenientes do motor e pelo contra torque resultante do contato pneu-solo. Isso possibilita que a relação do sistema seja ampliada ou reduzida.

No segundo estágio, ocorre apenas a ampliação do torque, através de uma caixa de redução com relação fixa, composta por dois pares de engrenagens. Esse tipo de sistema de transmissão é comumente utilizado em Utvs e quadriciclos.

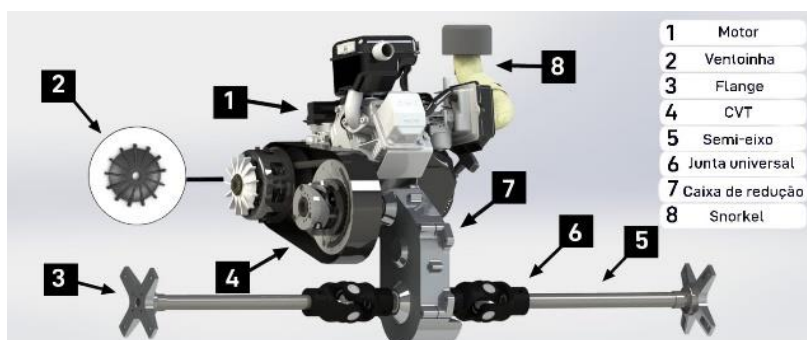


Figura 1: Componentes que compõe o subsistema de *Powertrain*. (Autoria Própria)

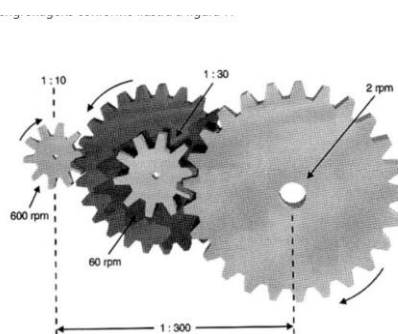


Figura 2: Disposição das engrenagens em uma caixa de redução.[16]

Na Figura 2 pode ser observadas as engrenagens que compõe a caixa de redução. Constituída por dois pares de engrenagens cilíndricas de dentes retos, ampliando o torque recebido da CVT e repassado para as rodas através de semieixos e flanges.

2.2 Análises de Falha

As análises de falhas estão cada vez mais frequentes na indústria, proporcionando o aumento da confiabilidade no desenvolvimento de novos mecanismos, além da definição de atividades estratégicas que possibilitem o aumento da vida útil dos mesmos. Para que isso ocorra, são utilizadas metodologias com o intuito de tornar esse processo de identificação de falhas mais intuitivo. Essas metodologias têm como propósito solucionar uma falha, que esteja afetando o funcionamento dos mecanismos, identificando o elemento causador do evento.

2.2.1 Árvore da Análise de Falha

A Árvore de Análise de Falha (*Fault Tree Analysis – FTA*) é realizada após a ocorrência de um evento indesejado. Ela é útil na engenharia de confiabilidade, gerenciamento de riscos e segurança. Por exemplo, ao aplicar esse método em um processo dedutivo, são expostos os possíveis eventos subjacentes à falha. Por meio de um diagrama, essas possíveis causas são detalhadas através de fatos que dão sustentação à possibilidade de falha, ajudando a delinear os eventos que ocasionaram a causa e que possam ter desempenhado um papel precursor.

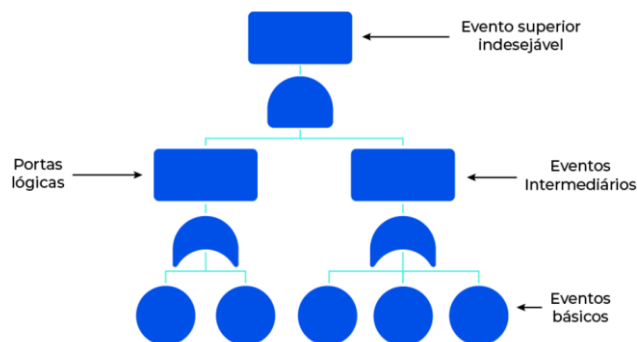


Figura 3: Estrutura lógica da árvore da análise de falha [5]

Como pode ser observado na Figura 3, a aplicação da árvore de análise de falha consiste em posicionar o evento indesejado no topo da árvore. Em seguida, são listados os eventos que podem ocasionar o evento indesejado. Para cada evento intermediário mencionado, é necessário identificar os eventos básicos que contribuem para essa hipótese. Ao final, teremos as prováveis causas em potencial da ocorrência do evento indesejável. Com isso, podemos implementar medidas mitigadoras para evitar a recorrência de eventos semelhantes.

Ao empregar a técnica de árvore análise de falhas, as empresas podem aprimorar sua habilidade de prever, evitar e lidar com situações indesejáveis, o que resulta em benefícios para a segurança, confiança e eficácia de seus sistemas e procedimentos.

2.3 Tipos de falhas mecânicas

A determinação do tipo de falha ocorre através da observação de suas características, tais como o tipo de carga, que pode ser estática, dinâmica ou por impacto; a temperatura de serviço, se inferior, próxima ou superior à temperatura de recristalização do material; o modo de propagação da trinca, se por rasgamento, cisalhamento ou fratura; o tempo de propagação da falha; a presença de deformação plástica; o aspecto visual macroscópico da trinca; e o aspecto visual microscópico, podendo ser classificadas como frágeis, dúcteis, por impacto, de fluência e por fadiga.

2.3.1 Fraturas Frágeis

A fratura frágil ocorre através da aplicação de uma carga estática, caracterizando-se por não apresentar nenhuma deformação e pela rápida propagação da trinca causadora da ruptura. A direção do movimento da trinca é, aproximadamente, perpendicular à direção da tensão de tração aplicada, resultando em uma superfície de fratura relativamente plana [4]. Frequentemente, microscopicamente, a peça apresenta uma superfície brilhosa, com seu modo de falha por clivagem, características de fratura transgranular. Entretanto, fatores como o trincamento em altas temperaturas e a presença de corrosão podem ocasionar uma fratura intergranular.

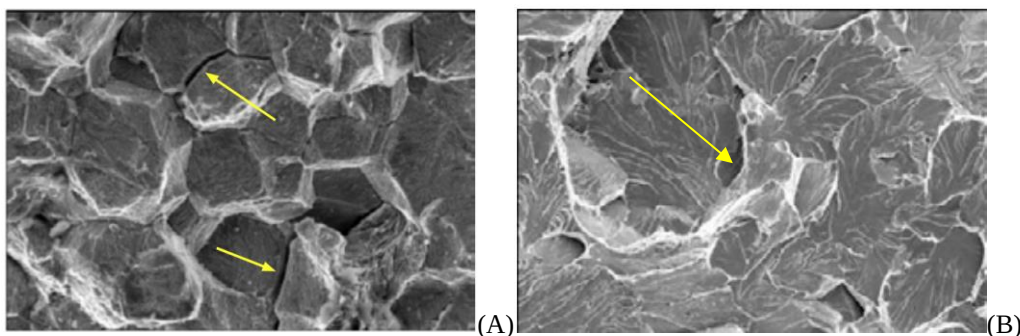


Figura 4: (A) Fratura intergranular do aço 1050; (B) Fratura transgranular do aço 1050. [11].

A Fratura transgranular ocorre quando a trinca se propaga pelo interior de cada grão, percorrendo entre os grãos mais favoráveis a essa propagação. Já no caso das fraturas intergranulares, a trinca percorre o contorno do grão ocorrendo quando os contornos de grãos são mais frágeis do que a rede cristalina, a distinção entre transgranular e intergranular somente é possível com a utilização de um MEV.

Na maioria dos casos de fraturas frágeis em aços, é possível observar características superficiais, como uma série de "marcas de sargento" em forma de "V" que se formam próximo ao centro da seção transversal da fratura, apontando na direção do ponto de iniciação da trinca. Além disso, podem ser observadas nervuras radiais em forma de leque que se iniciam a partir de um único ponto, o local de origem da falha.

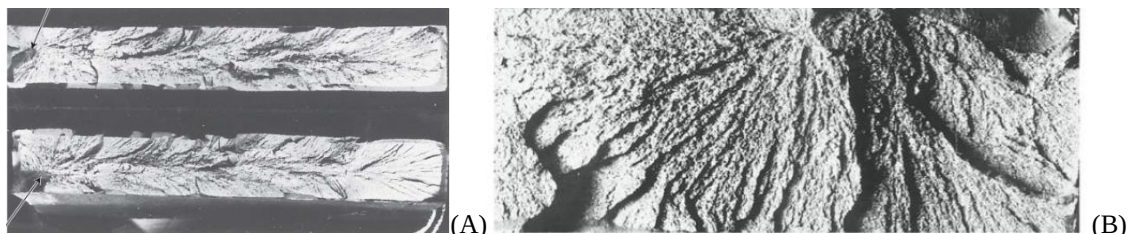


Figura 5: (A) Marcas em forma de V; (B) Nervuras radiais em formato de leque. [4]

Nas fraturas frágeis, ocorre a separação dos planos cristalinos de um material, resultante da ruptura das ligações atômicas. Este fenômeno pode gerar pequenas deformações que, aliadas às sucessivas rupturas, dão origem às marcas de clivagem. Essas marcas apresentam um aspecto visual semelhante a degraus, decorrente da mudança de planos cristalinos no momento da propagação da trinca.

2.3.2 Fraturas Dúcteis.

Fratura dúctil ocorre após a aplicação de uma carga estática, apresentando deformação plástica em um processo lento. Nos aços quando submetidos a esforço de tração, a sua estrutura antes da ruptura mostra uma diminuição da seção transversal, característica denominada de "estricção", em fraturas dúcteis cavidades são formadas no interior da peça, aumentando de tamanho no sentido em que a tensão é aplicada e formando trincas de formato elíptico, que antecedem a ruptura total do material. É possível observar essas cavidades na superfície do material por meio de análises microscópicas. Quando possuem formatos esféricos, a causa da ruptura foi esforço de tração uniaxial; já quando apresentam formatos parabólicos, a causa foi cisalhamento. Tais microcavidades são denominadas "dimples" e à medida que o material é solicitado mecanicamente, estas coalescem gerando trincas que se propagam rapidamente por meio de esforços cisalhantes, ao longo do material e em direção à superfície externa, levando à fratura final [14].

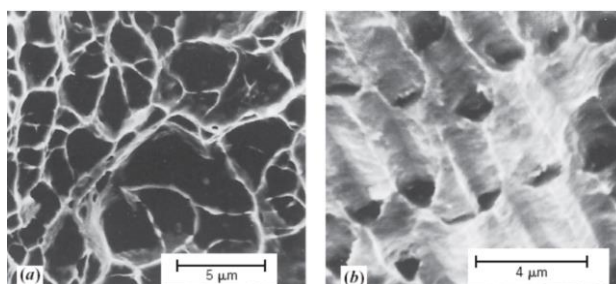


Figura 6: (a) Fractografia eletrônica de varredura visualizando cavidades com formatos esféricos. (B) Fractografia eletrônica de varredura visualizando cavidades com formatos parabólicos. [4]

Os lugares preferenciais para formação de vazios são inclusões, partículas de segunda fase ou partículas finas de óxidos, enquanto nos metais de alta pureza os vazios podem se formar em pontos triplos de contornos de grão [7]. A região de fratura nesse caso possui um aspecto fibroso resultante da grande deformação plástica sofrida pelo material.

2.3.3 Fratura por Impacto

Fratura por impacto ocorre quando um material é submetido a uma carga dinâmica elevada, resultando em uma ruptura súbita e rápida. O tipo de material e sua microestrutura influenciam diretamente no desempenho do material em suportar o impacto, sendo esses materiais caracterizados por boa ductilidade e tenacidade. Em materiais nos quais há presença de inclusões, descontinuidades e heterogeneidades, é mais provável o surgimento de trincas

Os métodos para avaliar a resistência de um material ao impacto incluem ensaios mecânicos, como os de Charpy e Izod, que quantificam a quantidade de energia que o material absorve ao sofrer um impacto. Macroscopicamente, é possível observar o deslocamento de material ao redor do local onde foi submetido ao impacto, indicando a região onde o material sofreu distorção antes de falhar. Em geral, materiais mais dúcteis tendem a ter uma maior resistência ao impacto, pois absorvem melhor a energia proveniente do impacto. Os aços com menor tamanho de grão frequentemente exibem boa ductilidade e conseqüentemente resistem melhor ao impacto, uma vez que grãos menores dificultam a quebra de seus arranjos, devido à forma como estão organizados.

2.3.4 Fratura por Fluência

Frequentemente, os materiais estão sujeitos a trabalharem em temperaturas adversas, como é o caso dos mecanismos de um motor ou dos que compõem uma caldeira, de tal forma que suas características mecânicas são alteradas em função da difusão dos átomos, movimento de discordâncias, escorregamentos de contornos de grãos e da recristalização. Para os materiais metálicos, a investigação da causa da fratura por fluência é recomendada quando a temperatura de trabalho é de aproximadamente 40% da temperatura de fusão. Através de ensaios mecânicos, e do gráfico abaixo é possível observar que, quando submetido à temperatura de fluência e a um esforço constante, ao longo do tempo o corpo de prova terá uma deformação, até que ocasione a sua ruptura.

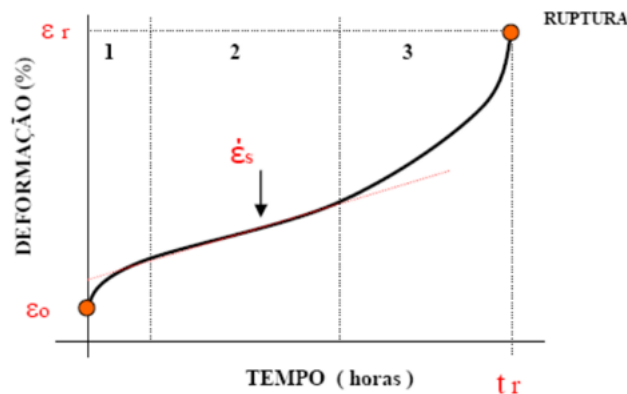


Figura 7: Gráfico padrão por fluência. [8]

No gráfico, é possível observar que no primeiro estágio há uma pequena faixa onde a fluência é decrescente; isso sugere que o material está apresentando um aumento na resistência à fluência [4]. Essa característica é resultado do encruamento ocorrido nesse instante.

A ruptura é resultado de alterações microestruturais, como por exemplo a separação dos contornos de grão e a formação de cavidades. Em cargas de tração, também pode ocorrer a diminuição da área da seção transversal [4]. O que resulta em uma falha com característica intergranular e com a presença de dimples.

2.3.5 Fratura por Fadiga

[9] Define fadiga como o “processo progressivo e localizado de modificações estruturais permanentes ocorridas em um material submetido a condições que produzam tensões e deformações cíclicas, podendo culminar em trincas ou fratura após um certo número de ciclos”.

Falhas por fadiga ocorrem em materiais sujeitos a carregamentos cíclicos, nos quais as tensões aplicadas variam ao longo do tempo. Esse tipo de falha é identificado pelo progressivo e cumulativo desenvolvimento de danos no material.

Essa falha ocorre em três estágios:

- Surgimento de trincas de tamanhos microscópicos na direção das descontinuidades formadas pelos contornos de grãos.
- As trincas que surgiram inicialmente mudam sua direção, posicionando-se de forma perpendicular à onde a tensão está sendo aplicada.
- Por fim, a trinca se propaga a um tamanho crítico que ocasionará a falha do material.

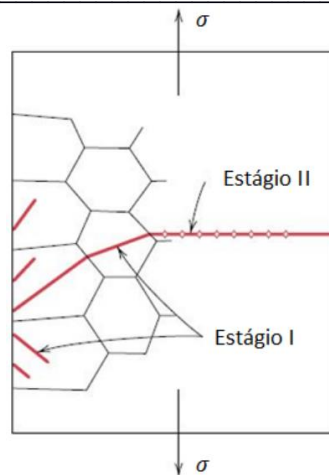
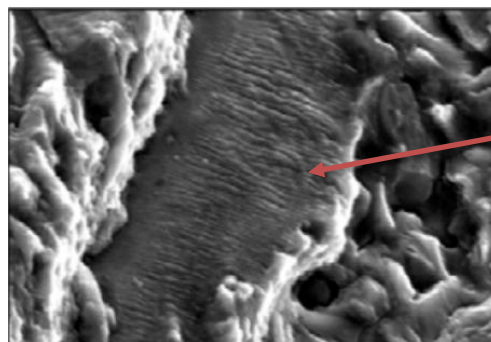


Figura 8: Ilustração os estágios de uma falha por fadiga. [Adaptado de 4]

A superfície de fratura do estágio I não apresenta morfologia característica quando analisada microscopicamente, porém a fratura do estágio II, que pode ter características marcantes como é o caso das estrias, presentes em matérias com ligações CCC, CFC e HC. (Figura 9).

Conforme ELLWANGER [10], a iniciação de uma trinca por fadiga pode ser verificada normalmente na superfície do corpo, visto que nesta localidade a concentração de tensões é máxima ou porque os cristais apresentam menos apoios entre si facilitando a ocorrência de deformações plásticas.

As falhas por fadiga têm como característica em sua superfície, marcas de estrias, proveniente das deformações ocasionadas pelos carregamentos cíclicos, que variam de formato conforme o material, das condições de carregamento e do ambiente em que o material está operando.



Marcas de estrias

Figura 9: Marcas de estrias em um componente metálico. [11]

Uma característica das estrias é que o espaçamento entre elas está diretamente ligado à velocidade de propagação da trinca. Materiais com dureza igual ou superior a 50HRC apresentam estrias discretas devido à ausência de ductilidade nesses materiais.

As falhas de fadiga geralmente surgem em regiões com concentradores de tensão, como entalhes de chavetas, furos, descontinuidade de geometria, em materiais metálicos o comportamento elástico-plástico localizado, leva a deformações plásticas concentradas nessas regiões. Essas deformações plásticas podem promover a iniciação e propagação de trincas de fadiga, especialmente em materiais metálicos.

Existem características que ajudam a entender o tipo de fadiga atuante, sendo a fadiga de baixo ciclo (LCF) e a fadiga de alto ciclo (HCF) duas delas. Ciclo é definido como o número de vezes que ocorre esforço alternado no material. Para os aços frequentemente considera-se uma fratura por fadiga de baixo ciclo quando a peça tem uma resistência inferior a 10^4 ciclos, além de apresentar deformação plástica. De forma análoga, uma falha com características de fadiga de alto ciclo ocorre quando a resistência é superior a 10^4 ciclos, apresentando deformações elásticas.

Ao interpretar o modo ao qual o material está sendo submetido aos esforços, é importante verificar se existe um padrão simétrico de tração e compressão ao longo do tempo, bem como a presença de trincas ou cantos vivos. No dimensionamento de um componente, o principal ponto analisado é a sua vida útil, buscando garantir que essa peça alcance uma vida infinita. Medidas que aumentam a tenacidade, como tratamento térmico, redução de tamanho de grão, limpeza do aço, entre outras, contribuem para aumentar a resistência à nucleação de trincas por fadiga em concentradores de tensão.

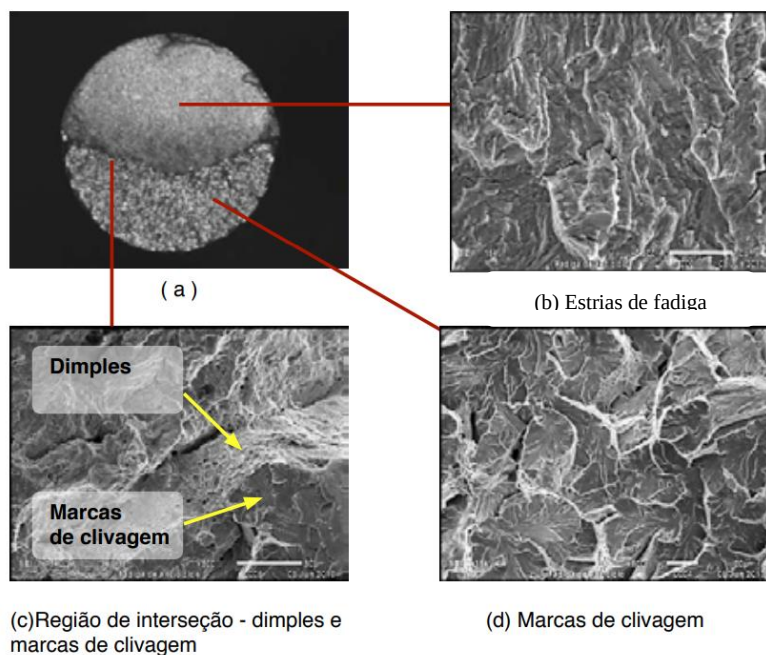


Figura 10 – MEV realizado na superfície de um eixo após ensaio destrutivo de fadiga. [11]

Na Figura 10 é possível visualizar uma fratura por fadiga de alto ciclo, (A) visão macroscópica da falha, (B) é visto as marcas de estria, marca característica, (C) é a região de transição da fratura frágil e dúctil e, por fim, em (D) a região em que a fratura é totalmente frágil.

2.4 Microscopia eletrônica de varredura - MEV

É um dos equipamentos mais versáteis utilizados nos estudos dos materiais, devido à possibilidade de análises microestruturais de elementos sólidos, gerando imagens tridimensionais e fornecendo informações químicas, morfológicas e topológicas. É essencial nas análises de falhas, permitindo a observação da superfície da fratura, como seu tamanho, estrutura e forma. O MEV convencional apresenta uma coluna óptico-eletrônica adaptada a uma câmara porta amostra aterrada, sistema eletrônico, detectores e sistema de vácuo [12].

Um feixe de elétrons emitidos frequentemente por uma fonte de tungstênio incide sobre a superfície da amostra e, por meio de uma diferença de potencial que varia de 0,5 a 30 kV, percorre toda a sua extensão. Com a radiação emitida, um detector transforma a imagem proveniente dos elétrons que sofreram espalhamento elástico, denominados de retroespalhados, em imagens capazes de observar a composição química do material. Para os elétrons secundários, de baixa energia, observa-se a topologia do material. Em ambas as radiações dos elétrons, a imagem é transformada em uma imagem altamente resolutiva e ampliada.

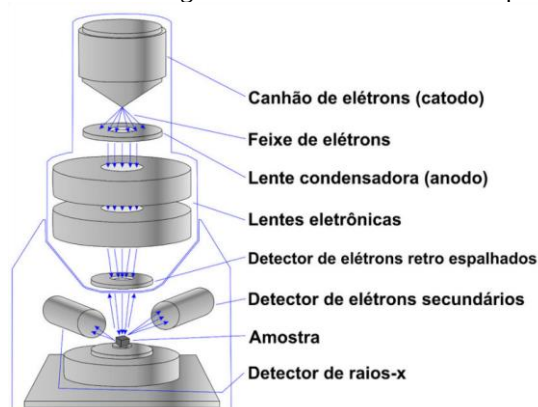


Figura 11: Diagrama esquemático do MEV. [13]

Para que seja realizada a análise microscópica, é necessário garantir que a amostra tenha tamanho máximo de 1,5 cm³, cabendo na porta amostra do equipamento. Nos materiais metálicos, apenas a limpeza da superfície com desengraxante é suficiente; no entanto, em materiais não metálicos, é necessário realizar uma cobertura com um material eletricamente condutivo, possibilitando a realização da análise MEV.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Identificação da falha mecânica

Durante uma inspeção de rotina, para conferir a integridade da caixa redutora, observou-se que a coroa do segundo par de engrenagens apresentava uma trinca no entalhe do rasgo de chaveta, conforme ilustrado na figura 11. A trinca teve início no núcleo da peça, estendendo-se até sua parte externa e, por fim, rompendo parcialmente o componente.

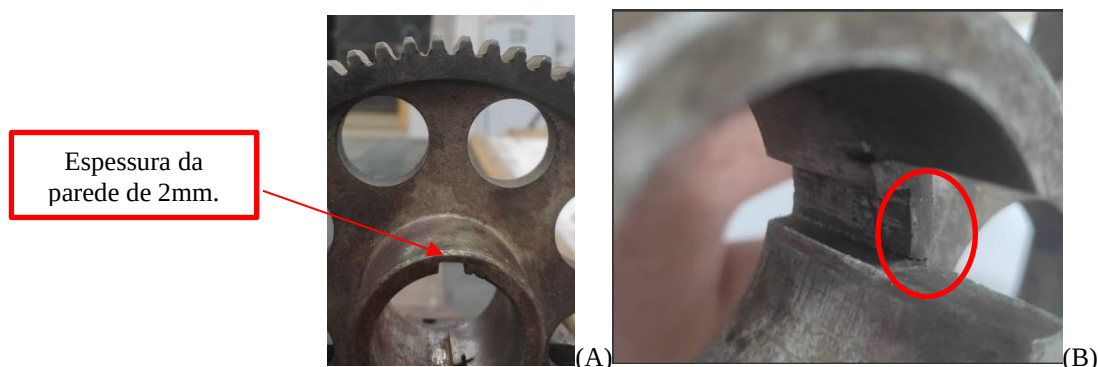


Figura 12: (A) Local semelhante onde ocorreu a ruptura, (B) Localização da origem da trinca. (Autoria própria)

Buscando preservar os demais componentes que compõe o sistema de caixa redutora do veículo, evitando prejuízos maiores, optou-se por substituir essa engrenagem e destinar a peça fraturada para estudos, a fim de compreender o que levou à falha mecânica do componente e, com isso, obter propostas de ações mitigadoras para evitar nova falha mecânica e, assim, aumentar confiabilidade do sistema.

3.2 Aplicação do Método de Análise de Árvore de Falha

Buscando compreender a causa raiz que originou a falha no rasgo de chaveta do segundo par de engrenagens da caixa de redução do protótipo, utilizamos a metodologia da árvore de falhas. Elencamos três possíveis possibilidades de causa, todas as quais foram analisadas, buscando evidências que comprovem ou descartem essas hipóteses.

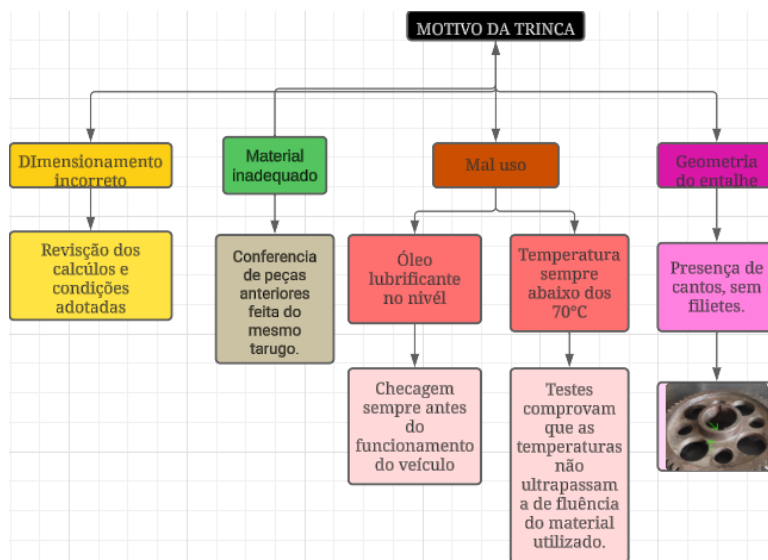


Figura 13: (A) Árvore de falha da trinca. (Autoria Própria)

Foi revisado todo o material utilizado no dimensionamento, garantindo que o comprimento, altura e largura do rasgo de chaveta estavam conforme o projeto, aptos a suportar os esforços submetidos. Realizou-se o levantamento da próxima hipótese: a confiabilidade do material. Foi analisado que o mesmo tarugo foi utilizado em engrenagens de caixas de redução anteriores, que não apresentaram falhas, além da nota fiscal do tarugo ter sido emitida por um fornecedor de qualidade. O mau uso do equipamento foi considerado como possível causa da falha, porém não houve fatos que comprovassem tal alegação. Além disso, foi considerado todo o esforço possível no momento do dimensionamento, visto que o sistema de CVT utilizado varia sua relação de forma linear e suave. Uma característica que chamou atenção foi o fato de o início da trinca ocorrer próximo à mudança

de diâmetro da seção transversal, a qual ocorreu sem a presença de um raio de arredondamento. Isso sugere que a geometria do entalhe esteja fortemente relacionada à falha, uma vez que a ausência de um raio de arredondamento nessa mudança de seção transversal diminui a resistência à fadiga do componente.

3.3 Análise por MEV

Buscando observar as características microscópicas presentes na seção transversal da fratura, a fim de identificar o modo de falha e avaliar se ocorreu de forma instantânea ou progressiva, de modo a corroborar as hipóteses vistas na árvore de falha, foi realizada uma análise fractográfica através do MEV. Essa análise proporcionou imagens superficiais do local da falha, possibilitando a identificação do tipo de fratura.

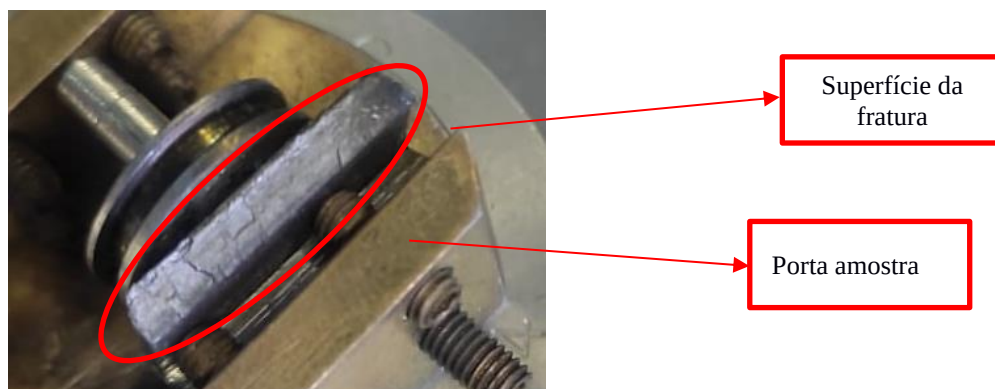


Figura 14: Amostra utilizada no MEV (Autoria Própria)

Para a realização das imagens, foi necessário preparar uma amostra da trinca. Portanto, realizou-se um corte na seção paralela à trinca, de forma que fosse possível posicioná-la no suporte de amostra. A peça teve sua superfície limpa com desengraxante, evitando que corpos estranhos atrapalhassem a leitura da superfície. Um total de 10 imagens foi retirado ao longo de toda a amostra, principalmente próximo à extremidade, buscando observar a mudança de aspecto na superfície, buscando enfatizando a característica de uma fratura por fadiga.

O modelo do equipamento utilizado para a realização do MEV foi o Vegan3, fabricado pela Tescan, que possui resolução máxima de 3 nm, e magnificações de até 300 kx. As imagens realizadas possuem ampliações que variam de 70x a 280x. Um enfoque maior foi dado nas regiões próximas à superfície, com o intuito de localizar marcas características que indiquem que a falha foi por fadiga.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analisando as imagens registradas no MEV, com base nas características observadas, é notado que os padrões são semelhantes aos mostrados na figura 10. Na Figura 17, A e C, as marcas de estrias são evidentes, localizadas principalmente na região próxima à superfície da trinca, característica comum em falhas por fadiga. Por se tratar de um aço de baixo carbono, que possui ductilidade é possível observar *dimples* (Figura B), característica de uma fratura dúctil, já na parte da ruptura final da peça é notável marcas de clivagem (Figura D).

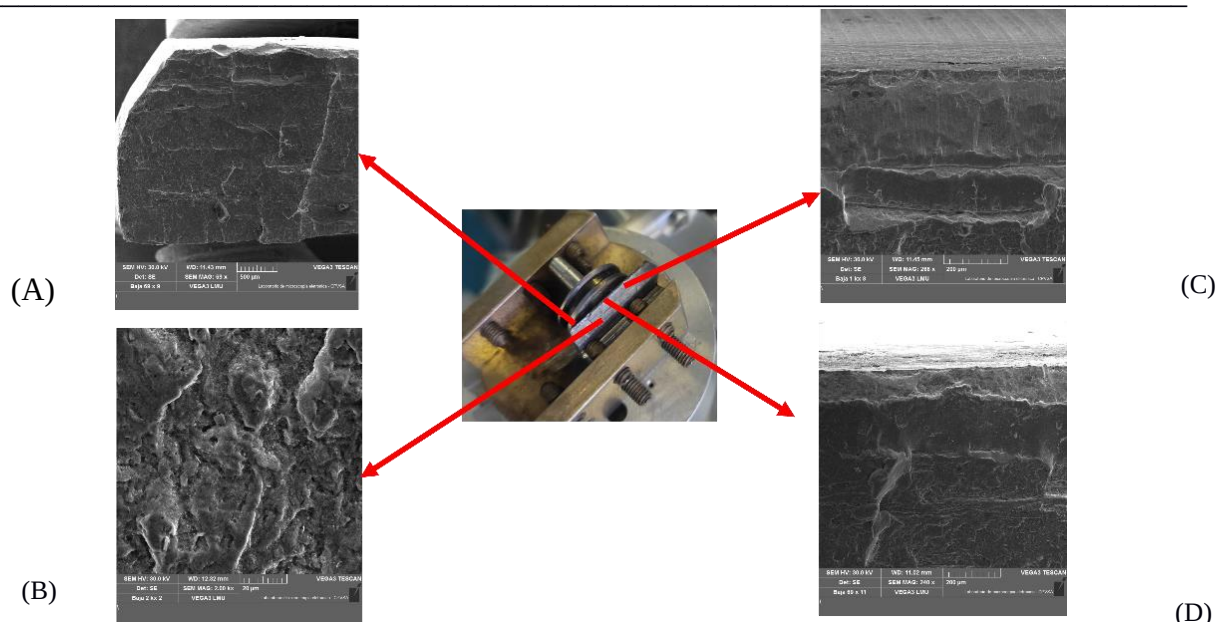


Figura 15: Imagens realizadas no MEV. As imagens A, B, C e D possuem, respectivamente, ampliações de 70x, 2000x, 70x e 280x. (Autoria Própria)

A engrenagem estava sujeita a esforços cíclicos, porém sem picos de tensão superiores à tensão de trabalho para a qual foi projetada, e a temperatura estava abaixo da temperatura de fluência do aço do qual a engrenagem é constituída. Além disso, a trinca surgiu tardiamente, após um longo período de uso do componente. À primeira vista, a superfície apresentava relevos que poderiam ser identificados como marcas de praias, ou fibras referentes às deformações plásticas antes da falha.

Comparando as imagens obtidas aqui, por MEV, com a figura 10, foi possível afirmar que a falha ocorreu por fadiga de alto ciclo, porém podemos observar nas imagens aspectos característicos de fratura dúctil e frágil na fratura, dando a interpretar que a fratura iniciou na região plástica e por fim com a trinca já estabelecida ela sucumbiu de forma frágil.

Com base na árvore de falha foi possível filtrar os motivos que ocasionou a falha, sendo mais assertivo, na definição em que a geometria da peça foi o principal causador da falha, ganhando tempo e permitindo focar em um único motivo, o pequeno raio de arredondamento na mudança de diâmetros da parede da engrenagem para a geometria que serve de acoplamento para o eixo.

Considerando o ciclo da fadiga, Segundo Turatti (2017) classifica-se a fadiga em: fadiga de baixo ciclo (FBC) com número de até 10^4 ciclos, ou ainda fadiga de alto ciclo (FAC), que corresponde a números de ciclos superiores a 10^4 ciclos, pode-se sugerir que a peça investigada aqui sofreu fadiga de alto ciclo, devido já haver um quantitativo de trabalho superior a 30 horas.

CONCLUSÕES

Ao término deste trabalho, com base no conhecimento das condições de trabalho da engrenagem, em que os esforços durante o trabalho da engrenagem ocorrem de forma alternada, no tempo estimado de uso e nas características visuais macro e microscópicas da falha, foi possível concluir que a falha do mecanismo se deu por fadiga. Conforme analisado na árvore de falhas, a característica de maior relevância para o ocorrido da falha foi a mudança brusca de diâmetro que proporcionou a diminuição da resistência à fadiga, sendo esta característica definida como o motivo da falha.

O uso da árvore de falhas contribuiu para avaliar os possíveis causadores de falhas. Com a descoberta do motivo da falha, proporcionou ao projeto uma melhoria a longo prazo, no sentido de definir ações mitigadoras para evitar a recorrência de falhas semelhantes.

Como solução para evitar que falhas como estas ocorram novamente nas engrenagens da caixa de redução, podem ser tomadas ações, tais como aumentar o raio de arredondamento na mudança de diâmetro da parede da engrenagem para a circunferência que possibilita o acoplamento no eixo, e melhorar o acabamento superficial através de polimento.

Outro ponto de grande importância é a chaveta utilizada para transmitir o torque da engrenagem para o eixo. Se possível, a substituição das chavetas por estrias como elemento transmissor de torque poderá diminuir a concentração de tensão em um único entalhe.

5. AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha gratidão a toda minha família pelo apoio constante que têm me proporcionado, ajudando-me a enfrentar os desafios da vida acadêmica. Em especial, quero agradecer à minha mãe, Adriana.

Ao projeto de extensão Cactus Baja, que forneceu o material de estudo presente neste artigo, estendo meus agradecimentos a todos os membros da temporada 2023/2024, incluindo o orientador do projeto, Dr. Zoroastro Torres Vilar.

Agradeço também ao meu orientador pela paciência, colaboração e por todos os ensinamentos transmitidos ao longo deste trabalho.

Aos meus colegas de estágio na Contrel Locações, expresso minha gratidão pelo incentivo e pela ajuda que têm me fornecido durante este período.

Por fim, gostaria de agradecer a Bruno Caio, técnico do laboratório presente no CEPAS, onde foi realizada a análise de MEV que contribuiu para este estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ATLAS DE ACIDENTES NO TRANSPORTE. Consulta de Dados Estatísticos: Acidentes. Disponível em: <<https://www.atlasacidentesnotransporte.com.br/consulta?grafico=acidente#graph>>. Acesso em: [18/11/2023].
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994
- [3] UBEROI, R. S.; GUPTA, U.; SIBAL, A. Root Cause Analysis in Healthcare. Apollo Medicine, Vol. 1, 2004, p. 60-63.
- [4] CALLISTER JR., W. D. Ciência e Engenharia de Materiais. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008.
- [5] TRACTIAN. Análise da Árvore de Falhas. Disponível em: <<https://tractian.com/blog/analise-da-arvore-de-falhas>>. Acesso em: [02/12/2023].
- [6] RODRIGUES, Francinei. O Diagrama de Ishikawa: Uma vez por todas. LinkedIn, [Data de Publicação]. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/o-diagrama-de-ishikawa-uma-vez-por-todas-francinei-rodrigues/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: [05/03/2024]
- [7] GEORGE E. DIETER, Metalurgia Mecânica 2nd Edição, Cornegie – Mellon University.
- [8] RESEARCHGATE. Curva típica de fluência. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-17-Curva-tipica-de-fluencia_fig10_281409121>. Acesso em: [23/01/2024].
- [9] ASTM-E 823-96, 2000 apud BOTELHO, 2009)
- [10] ELLWANGER, G.B., “Tecnologias de exploração de petróleo”, Apostila cursos de Mestrado e doutorado PEC – COPPE – UFRJ – 2009;
- [11] SOUSA FORTE, Mariana. CONTEÚDO DIGITAL PARA ENSINAGEM DE ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE FALHAS MECÂNICAS. 2013. 47 p. Dissertação (Mestrado em [Profissional de materiais]) - Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda. Disponível em: https://sites.unifoa.edu.br/portal_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/ficha-mariana-souza-forte.pdf. Acesso em: [03/12/2023].
- [12] PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012.
- DEDAVID, A. B.; GOMES, I. C.; MACHADO. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparo de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- [13] Manzani, Danilo, Universidade de Química de São Carlos, Introdução à Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Disponível em: <https://docplayer.com.br/153815617-Introducao-a-microscopia-eletronica-de-varredura-mev.html>. Acesso em: [08/01/2024].
- [14] DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981.
- [15] TURATTI, E. Avaliação do comportamento do Aço SAE 4140 submetido a ensaios de Fadiga. 2017. 103 f. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário Univates. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Curso de engenharia mecânica. 2017.
- [16] Newton C. Braga. "Mec070a". Newton C. Braga, <https://www.newtonbraga.com.br/robotica-e-mecatronica/5168-mec070a.html>, acessado em 18 de abril de 2024.