

ANÁLISE DE FALHA DA MANGA DE EIXO DE UM VEÍCULO BAJA

Saulo Nogueira Valente¹, Francisco Edson Nogueira Fraga²

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

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

Resumo: O presente trabalho teve como objetivo principal realizar uma investigação detalhada das possíveis causas que levaram à falha da manga de eixo do veículo baja da equipe Cactus Baja. A análise iniciou-se com um levantamento dos possíveis motivos que causaram a falha através de uma inspeção inicial do componente. Posterior a isto, foi escolhida a metodologia a ser utilizada na análise. Assim, utilizou-se a Árvore de Análise de Falha (FTA), por se tratar de um modelo consolidado na definição das causas da falha de um componente. Para uma análise mais precisa da superfície da falha, foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), que permitiu relacionar as características da superfície com os modos de falha conhecidos. A resultante desta análise mostrou que a falha da manga de eixo ocorreu por conta dos esforços de flexão no olhal do montante, tendo como fator agravante as microfissuras na superfície do componente, que atuaram como concentrador de tensão e ponto de início da trinca. A análise fractográfica mostrou que a fratura se iniciou de modo frágil nas extremidades da peça, apresentando características de fratura frágil transgranular, além de ausência de deformação plástica. O fim da fratura se deu de modo dúctil, onde as imagens do MEV mostraram aspectos característicos desse modo de falha, como a presença de dimples.

Palavras-chave: Falha; MEV; FTA

1. INTRODUÇÃO

A análise de falha é uma disciplina essencial na engenharia, fundamental para garantir a segurança, confiabilidade e eficiência dos sistemas e componentes. Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como foco a análise de falha de uma manga de eixo de um veículo BAJA SAE, utilizando a metodologia da árvore de falha e a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A investigação detalhada de falhas é crucial para entender os mecanismos subjacentes aos problemas encontrados e para implementar melhorias no design e processos de fabricação, prevenindo a recorrência de falhas similares no futuro. A importância da análise de falha está, em grande parte, em sua capacidade de identificar e corrigir falhas potenciais, o que não só melhora a segurança dos produtos, mas também reduz os custos associados a manutenção e *recall* [1]. Além disso, a análise de falha desempenha um papel essencial na melhoria contínua, permitindo ajustes tanto no design quanto na produção, tornando os sistemas mais robustos e confiáveis.

Em veículos BAJA SAE, que enfrentam condições extremas de operação e exigem alta resistência e desempenho, a análise de falha assume um papel ainda mais crítico. A robustez e a durabilidade desses veículos são fundamentais para seu sucesso em competições *off-road* e para a segurança dos competidores [2]. Assim, a análise de falha em componentes como a manga de eixo é essencial para garantir que o veículo possa operar de forma segura e eficaz em ambientes adversos.

O uso da árvore de falha e do MEV para investigar a manga de eixo permite uma abordagem metódica e detalhada para identificar as causas raízes das falhas. A árvore de falha é uma ferramenta eficaz para mapear e analisar eventos que levam a falhas, enquanto o MEV fornece uma visão detalhada da superfície de fratura, ajudando a identificar o mecanismo de falha [3]. Portanto, a análise de falha neste contexto é vital não apenas para garantir a segurança e o desempenho dos veículos BAJA SAE, mas também para proporcionar insights valiosos que contribuem para a melhoria contínua dos processos de engenharia e fabricação, evidenciando a importância de metodologias rigorosas na análise de falhas.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo analisar e identificar o mecanismo de falha ocorrido na manga de eixo da equipe Cactus, além de propor soluções para mitigar futuras falhas de mesma natureza em componentes críticos com este.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Projeto Baja SAE

O projeto Baja SAE é uma competição de engenharia onde estudantes universitários enfrentam o desafio de

projetar e construir um protótipo off-road para competições. O objetivo é proporcionar aos estudantes a experiência prática de desenvolvimento e gerenciamento de projetos, além de promover inovação e o trabalho em equipe. O regulamento técnico estabelece as normas para a construção do veículo e também sua operação [4]. Esse regulamento aborda os aspectos essenciais para a construção do veículo como dimensões, segurança, desempenho e normas ambientais. As equipes devem seguir rigorosamente as especificações para garantir a segurança dos participantes e a igualdade entre os competidores.

2.1.1 Sistema de suspensão

O sistema de suspensão, o qual faz parte do presente estudo, é responsável direto por garantir segurança, estabilidade, conforto e desempenho à um veículo. Por meio dele, as excitações providas das irregularidades do terreno podem ser parcialmente dissipadas, resultando em um maior conforto ao condutor. Os modelos mais comumente usados são as dependentes e independentes. A suspensão de um veículo pode variar quanto a sua geometria, tipo de amortecedor utilizado e outros parâmetros que interferem diretamente no desempenho. Essa variedade de parâmetros permite setups diversos, com foco em desempenho ou em conforto a depender do tipo de veículo que será fabricado.

2.1.2 Mecanismo de Suspensão da equipe Cactus BAJA

A equipe Cactus BAJA utiliza um sistema de suspensão do tipo duplo A, composto por dois braços triangulares que conectam os pneus ao chassi. Esse tipo de suspensão é amplamente empregado em veículos de alta performance, pois oferece excelente capacidade de absorção de impactos, garantindo uma dirigibilidade confortável sem comprometer o desempenho. O sistema é formado por diversos componentes que, em conjunto, asseguram seu funcionamento eficiente. Entre eles, destaca-se a manga de eixo, que é foco deste estudo, como mostra a Figura 1 (A) e (B). Essa peça desempenha um papel crucial no primeiro estágio de absorção dos impactos provenientes do terreno. A dissipação dessas forças ocorre progressivamente ao longo do conjunto, incluindo os amortecedores, até serem completamente absorvidas pelo chassi.

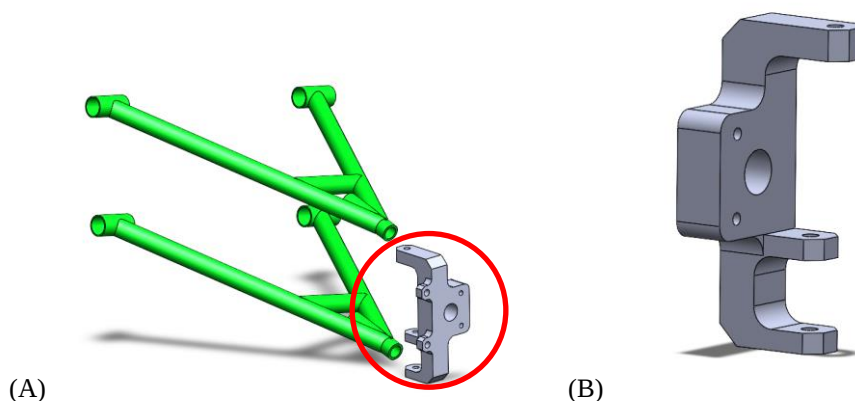


Figura 1: (A) Suspensão da equipe Cactus; (B) Manga de eixo. (Autoria própria).

2.2 Tipos de falhas

Uma das etapas mais desafiadoras de uma análise de falha é a identificação do tipo de fratura ocorrida no componente analisado. Nos materiais metálicos, as fraturas podem ser classificadas em dois tipos: Fratura dútil e Fratura frágil, onde essa classificação está baseada na capacidade do material apresentar deformação plástica [5].

2.2.1 Fratura Dútil

A fratura dútil é caracterizada pela capacidade do material em apresentar deformação plástica em torno de uma trinca que está avançando, é um tipo de fratura que apresenta um tempo maior de propagação da trinca em relação a fraturas frágeis. Assim, “o processo prossegue de maneira relativamente lenta conforme o comprimento da trinca aumenta.” [5]. No geral, esse tipo de fratura é preferível, pois ela apresenta evidências de falha antes que a mesma ocorra, possibilitando ações sejam tomadas para evitar a falha. No que diz respeito à superfície da fratura dútil, ela apresenta características peculiares nos aspectos macroscópico e microscópico. No macroscópico pode-se observar aspectos como: irregularidades, fibrosidade, opacidade na superfície e a formação do “pescoço” na região da trinca. No microscópico, geralmente se utiliza uma Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para auxiliar na análise. O principal aspecto notado é a presença de microvazios, também chamados de “dimples”, que são cavidades que se formam no material devido à tensão e que aumentam no sentido em que essa tensão é aplicada, conforme fica evidente na Figura 2 (A). A forma dessas cavidades pode variar de acordo com o tipo de tensão

aplicada, variando da forma esférica se o esforço for uniaxial ou parabólico se for cisalhamento.

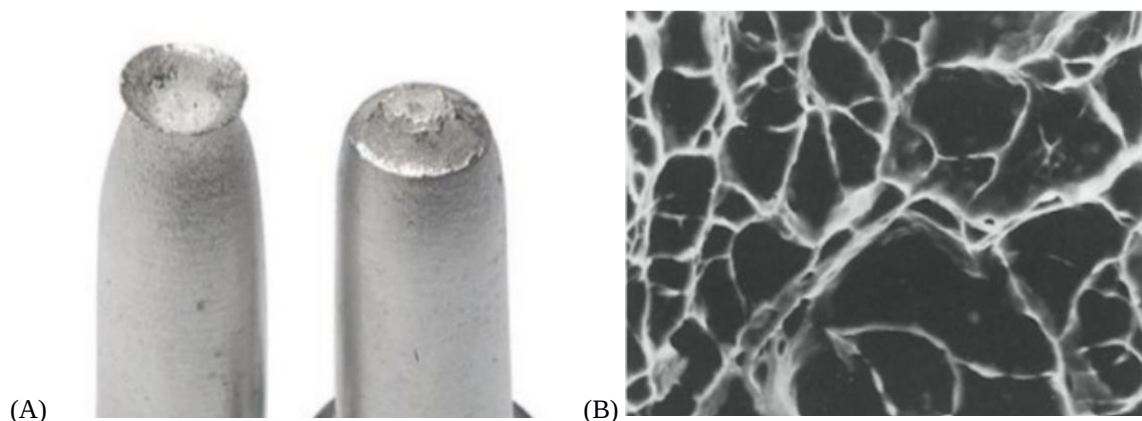


Figura 2: (A) Fratura tipo taça e cone no alumínio; (B) Microcavidades esféricas de uma fratura dúctil. Ampliação de 3300x. [5].

2.2.2 Fratura Frágil

A fratura frágil ocorre sem qualquer deformação apreciável e através da rápida propagação de uma trinca que se move na direção aproximadamente perpendicular à direção da tensão aplicada [6]. Visualmente, a superfície da fratura frágil apresenta aspecto brilhante e liso. Em alguns casos, com o auxílio de um microscópio, pode-se observar a presença de marcas de segmento em formato de “v”, que se formam próximo ao centro da seção transversal da fratura em direção ao ponto onde se iniciou a trinca. Embora as fraturas frágeis sejam caracterizadas por ausência de deformação plástica indicando que não houve qualquer absorção de energia, em alguns casos, em fraturas frágeis, pode haver uma pequena absorção de energia que está diretamente associada com as rupturas de ligações atômicas e à formação de superfícies de fratura, conforme destaca [7].

2.2.2.1 Fratura Transgranular

Na fratura transgranular, o mecanismo de propagação da trinca se dá por meio de rupturas sucessivas e repetidas de ligações atômicas ao longo dos planos cristalográficos, tal processo é denominado “clivagem”. O nome desse tipo de fratura se dá pelo fato da trinca se propagar através do grão, que é a região preferencial para a propagação da trinca neste caso. A nível microscópico, a superfície da fratura apresenta aspecto granuloso ou facetado, em resposta a de orientação nos planos de clivagem entre os grãos, como fica evidente na Figura 3.



Figura 3: Facetas de clivagem em grãos de ferrita. [6].

2.2.2.2 Fratura intergranular

A fratura frágil intergranular ocorre quando a trinca se propaga ao longo dos contornos dos grãos de um material cristalino, em vez de atravessar os grãos. Esse comportamento indica que os contornos de grão são regiões mais frágeis em relação ao interior do grão, sendo o caminho preferencial para a propagação da trinca. A superfície de uma fratura intergranular é caracterizada por uma aparência irregular e tridimensional, refletindo a separação

entre os grãos do material. Essa superfície tende a ser rugosa e facetada, devido às diferentes orientações dos planos de clivagem dos grãos. Além disso, é comum encontrar segregação de impurezas ou fases secundárias nos contornos dos grãos, o que pode enfraquecer essas regiões e facilitar a propagação da trinca.

2.2.3 Fratura por Fadiga

É comum elementos de máquinas falharem em razão de tensões repetidas ou flutuantes, porém, ao realizar uma análise mais cuidadosa, constata-se que as tensões reais máximas estavam abaixo do limite de resistência do material, e com frequência até abaixo da região de escoamento, conforme destaca [8]. A característica mais comum nesse tipo de falha é que as tensões foram repetidas muitas vezes. Daí a falha ser chamada de falha por fadiga.

Esse mecanismo de falha se assemelha a fratura frágil, pois ocorre de maneira súbita e sem apresentar qualquer indicativo, além da superfície ser plana e perpendicular ao eixo de torção. Já em termos de características, os dois modos de falha são distintos. A falha por fadiga pode ser entendida em três estágios: No primeiro estágio ocorre o surgimento de microcavidades, devido a deformação plástica cíclica seguida de propagação cristalográfica que se estende ao longo da origem. No segundo estágio, a fratura progride de microtrincas a microtrincas, formando marcas conhecidas como “marcas de praia”, que por sua vez são paralelas entre si e separadas por sulcos. O terceiro estágio consiste no ciclo de tensão final, quando o material restante não consegue suportar as tensões, e a fratura ocorre repentinamente. A fratura final pode ocorrer por micromecanismo frágil (clivagem) ou dúctil (formação de alvéolos).

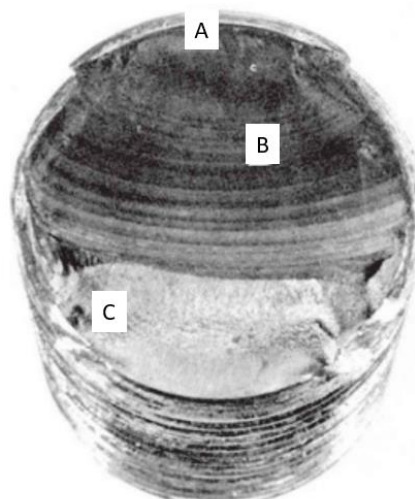


Figura 4: Falha por fadiga em um parafuso em razão de flexão unidirecional. [8].

Na Figura 4, nota-se o desenvolver da fratura, onde, no estágio inicial (A), temos o início da trinca no perfil da rosca, que, por sua vez, evolui para o estágio mais prolongado da falha (B), caracterizado pelas marcas de praia que são aparentes em quase toda superfície. E por fim o estágio final (C), onde o material rompe abruptamente.

No que diz respeito aos ciclos, a fadiga do baixo ciclo ocorre sob tensão elevada, geralmente acima do limite elástico, resultando em deformações plásticas graves e falha em menos de 10^4 a 10^5 ciclos. Já a fadiga do alto ciclo acontece sob moderadamente inferior ao limite elástico, com deformação predominantemente elástica, causando falha após um grande número de ciclos (acima de 10^5).

2.2.4 Fratura por Impacto

A fratura por impacto ocorre quando o material é submetido a uma carga súbita e elevada, resultando assim em uma falha catastrófica. A capacidade de absorção de energia do material é fundamental para caracterizar esse tipo de falha, pois a fratura pode ocorrer de forma dúctil ou frágil de modo que se for constatada deformação plástica, então a fratura ocorreu de forma dúctil indicando que o material absorveu parte da energia do impacto. Caso não se constate deformação, então o material não absorveu energia e a fratura ocorreu de maneira frágil.

2.2.5 Fratura por Fluência

A fratura por fluência ocorre quando o material é exposto a temperaturas elevadas e a um carregamento de natureza estática [5]. Esse tipo de falha ocorre em todos os tipos de matérias quando submetidos às condições especificadas acima. Para materiais metálicos, essa deformação é observada quando a temperatura a qual o material é exposto é aproximadamente maior que a relação mostrada abaixo na equação (1).

Aonde “Tf” é a temperatura absoluta de fusão do metal. A falha por fluência ocorre em três estágios: No primeiro estágio, a taxa de deformação do material é elevada e tende a diminuir com o tempo, isso devido ao material está se ajustando à carga aplicada, e a taxa de deformação diminui à medida que o material endurece. No segundo estágio, chamado de “fluência em regime permanente”, a taxa de deformação do material é aproximadamente constante, e a curva no gráfico se torna uma reta. Isso ocorre pelo equilíbrio entre o endurecimento do material e a recuperação de deformação plástica. Este é o estágio mais longo e importante para a vida útil do material. Por fim, no terceiro estágio ou “fluência acelerada”, a taxa de deformação aumenta rapidamente até a falha por conta da formação de trincas e cavidades internas. A Figura 5 apresenta os estágios da falha por fluência.

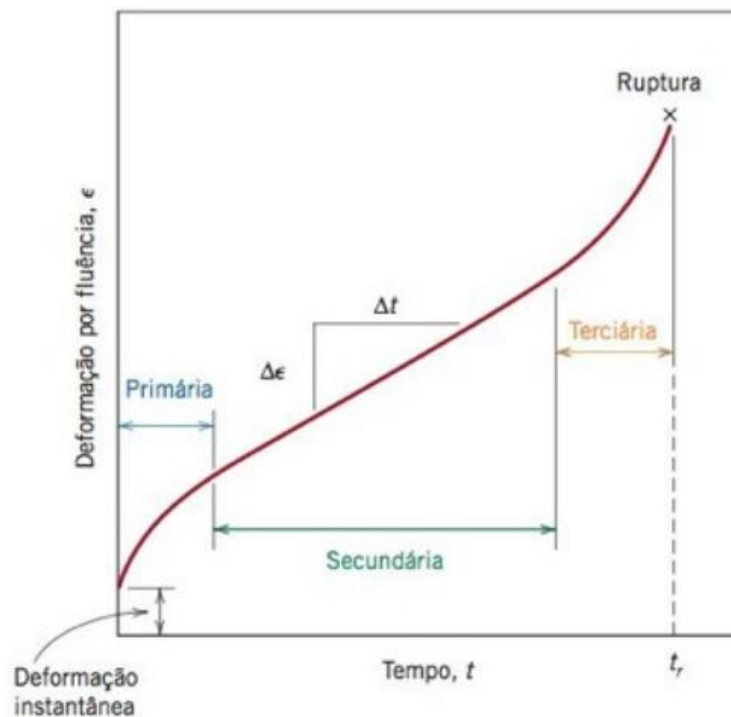


Figura 5: Estágios da falha por fluência. [5].

2.3 Análise de falha

Desde as últimas décadas, a preocupação com falhas em componentes mecânicos tem se intensificado e a necessidade de projetar e fabricar componentes e equipamentos seguros e eficientes tem sido a tônica da indústria atual. Nesse cenário, a análise de falha se coloca como um mecanismo sistemático utilizado para identificar as causas de falhas em componentes ou sistemas, utilizada para melhorar a segurança, confiabilidade e desempenho dos produtos. A importância da análise de falha para a melhoria contínua do design de componentes mecânicos é destacada por Shigley, que aborda como os engenheiros podem utilizar os resultados dessa análise para prevenir falhas futuras, considerando as condições de carregamento e os fatores de segurança [8].

2.3.1 Árvore de Análise de Falha (FTA)

A árvore de análise de falhas (FTA) é uma ferramenta estruturada utilizada para identificar as causas potenciais de uma falha em sistemas complexos. Por meio de uma abordagem gráfica, ela organiza eventos de forma hierárquica, partindo de um evento principal indesejado (topo da árvore) e decompõe suas causas em eventos menores, conforme a Figura 6. Essa metodologia auxilia na identificação de riscos, prevenindo falhas e redução de custos associados a paradas inesperadas. Esse método é particularmente eficaz na identificação de riscos potenciais e na priorização de ações corretivas. A norma ABNT NBR ISO 31010:2012 destaca a FTA como uma das principais técnicas de análise de risco, recomendando sua aplicação em diversos setores industriais.

A árvore de análise de falhas (FTA – *Fault Tree Analysis*) é um método mais intuitivo do que a Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA), pois se concentra em todas as falhas possíveis do sistema de um evento principal indesejado. Considerando que FMEA realiza análises para encontrar todos os modos de falha do sistema possíveis, independentemente de sua gravidade.

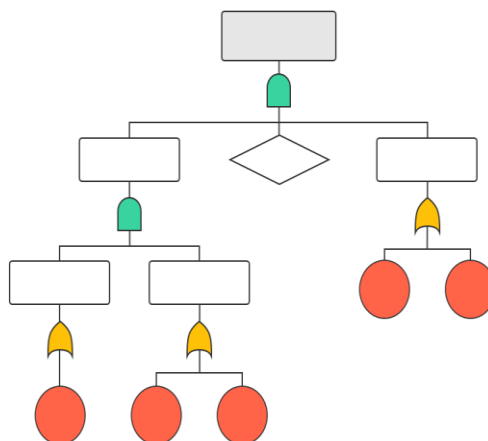


Figura 6: Árvore de Análise de Falha. [13].

2.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento essencial no campo da análise de falha em componentes pois proporciona imagens detalhadas da superfície da fratura do material em análise. O (MEV) é um aparelho que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida. Sua utilização é comum em biologia, odontologia, farmácia, engenharia, química, metalurgia, física, medicina e geologia [10].

Esse equipamento utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico convencional, o que permite solucionar o problema de resolução relacionado com a fonte de luz branca, conforme o esquema apresentado na Figura 7. Quanto ao seu funcionamento, um feixe de elétrons atinge a superfície da amostra de modo que alguns desses elétrons se dispersam formando um volume de interação. A forma deste volume depende principalmente da tensão de aceleração e do número atômico da amostra. É neste volume que os elétrons e as ondas eletromagnéticas produzidas são utilizados para a formação da imagem a ser analisada.

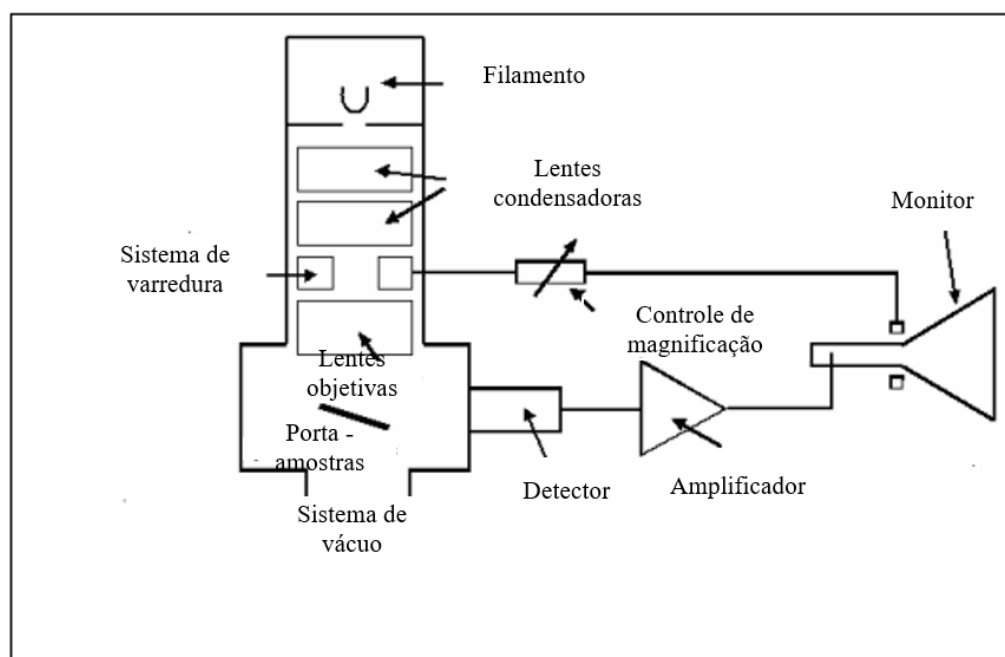


Figura 7: Desenho esquemático de um (MEV). Adaptado de [10].

Para análise, é necessário que a amostra não exceda o valor máximo de $1,5 \text{ cm}^3$ para que possa ser posicionada sem mais problemas no equipamento. Além disso, em materiais metálicos, por vezes é preciso fazer a limpeza da superfície da amostra utilizando materiais apropriados. No entanto, esse procedimento requer um cuidado especial, visto que o uso de materiais inadequados para limpar a superfície pode alterar a sua característica.

3 Materiais e Métodos

3.1 Processo de identificação da falha

O processo de identificação da falha foi feito imediatamente após o seu ocorrido. Primeiramente foi realizado uma inspeção visual detalhada do componente, bem como uma análise prévia da superfície da fratura e sua estrutura. Esse procedimento é essencial para a identificação prévia de elementos que caracterizem o tipo de falha como: trincas, deformação plástica visível, aspecto da superfície da fratura.

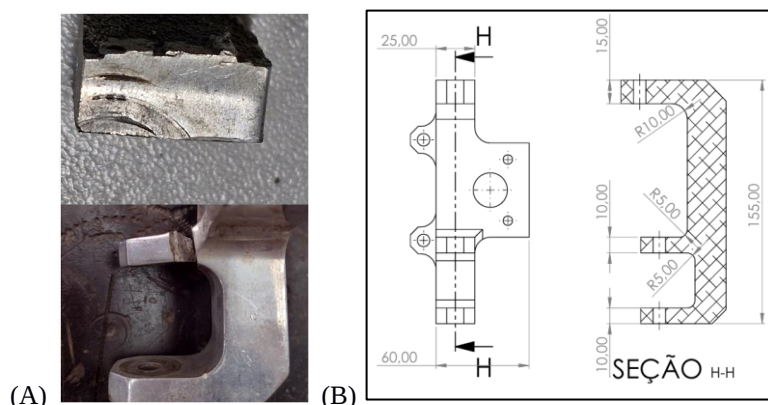


Figura 8: (A) Manga de eixo fraturada; (B) Dimensões da peça. (Autoria própria).

Assim, conforme a Figura 8, observou-se que a falha ocorreu sem deformação plástica visível a olho nu. Além disso, a superfície da fratura apresentou aspecto opaco enquanto a morfologia da superfície se apresentou de maneira fibrosa. Identificou-se também que a trinca se propagou das extremidades da peça em sentido ao centro da mesma onde por sua vez ocorreu a fratura.

3.2 Aplicação da Arvore de Análise de Falha

Após a identificação da falha, deu-se início à investigação técnica para determinar os eventos que levaram ao ocorrido. Assim, uma árvore de análise de falha foi desenvolvida elencando as principais hipóteses bem como suas causas e eventos secundários, além de propostas para resolução. A primeira etapa da árvore foi dividida em três partes, elencando as hipóteses primárias. Na sequência, as hipóteses secundárias foram elencadas de acordo com suas antecessoras, e em seguida as propostas de resolução.

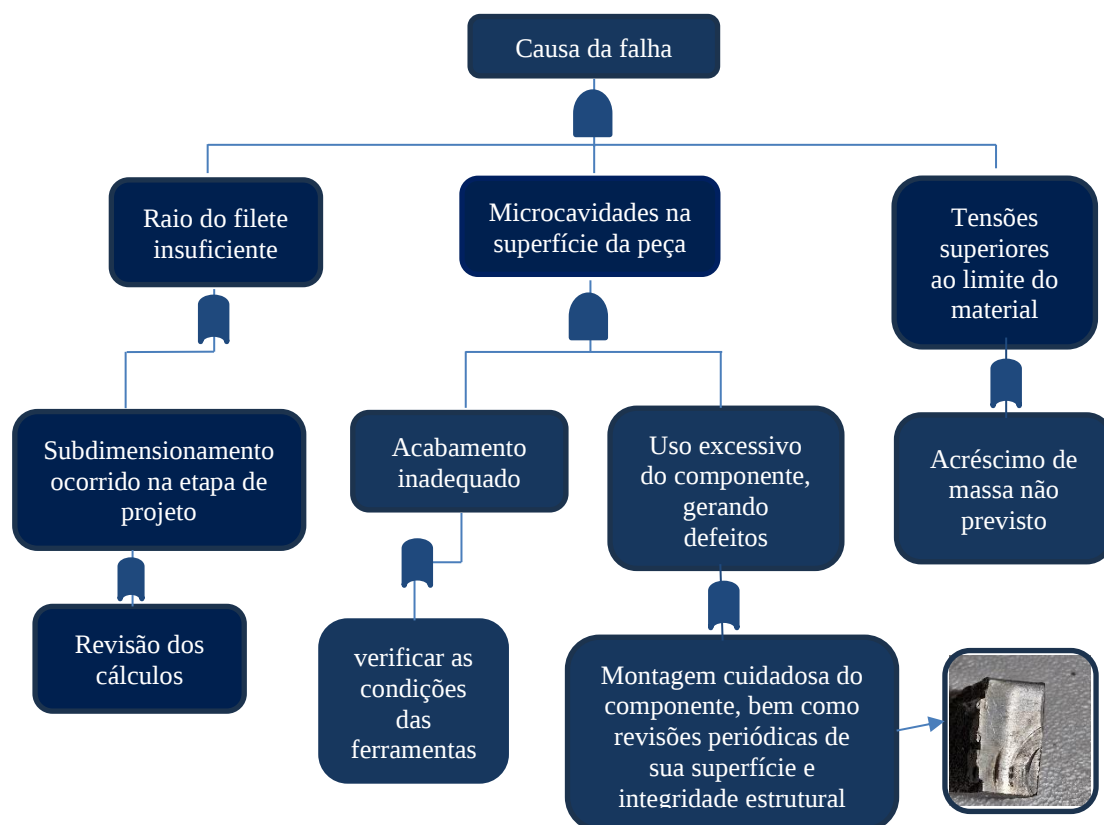


Figura 9: Árvore de Análise de Falha da manga de eixo. (Autoria própria).

Assim, conforme a Figura 9, primeira hipótese levantada foi referente ao raio do filete do componente, onde o mesmo poderia ser insuficiente e assim agir como um concentrador de tensão, tornando a região favorável ao surgimento de trincas. Na sequência, as microcavidades presentes na superfície do material também foram tidas como possíveis concentradores de tensão e pontos com potencial de iniciar a trinca por meio de nucleação. A terceira hipótese analisada levou em consideração a amplitude dos esforços aplicados ao componente, visto o protótipo sofreu acréscimo de massa em função da implementação do sistema 4x4, o que ocasionou uma condição de carregamento diferente daquele para o qual o componente foi projetado inicialmente, o que pode ter elevado as tensões a níveis superiores àqueles que foram considerados na fase inicial de projeto do componente.

3.3 Preparação da amostra e Análise no MEV

Para a preparação da amostra, foi utilizado uma ferramenta de corte (esmerilhadeira) para fazer a separação da amostra do restante do componente. Um paquímetro foi utilizado para garantir as dimensões da amostra.

A amostra foi devidamente preparada antes da realização do procedimento no microscópio. Uma limpeza foi feita na superfície do material de modo a eliminar impurezas que pudessem interferir a análise. Vale ressaltar que a limpeza foi feita utilizando materiais não abrasivos, de modo a não alterar a superfície a ser analisada. A amostra utilizada foi adaptada às dimensões do MEV, onde sua área total foi 1 cm².

Para corroborar as hipóteses levantadas na árvore de falha e compreender de modo mais detalhado o mecanismo de falha, foi realizada uma análise fractográfica no MEV, conforme mostra a Figura 10 (A). Por meio das imagens providas do microscópio pode-se analisar de modo assertivo a superfície da fratura e posteriormente determinar o tipo de falha ocorrido.

O modelo do microscópio utilizado na análise foi o Vegan3, da fabricante Tescan. O equipamento possui uma resolução máxima de 3 nm, e magnificações de até 300 kx. Um total de 12 imagens foram produzidas na análise, com aproximações de 15 x até 5 kx. A seleção dos locais de foco foi feita com base nas hipóteses levantadas e em referências bibliográficas, onde buscou-se um enfoque nas regiões centrais da superfície, bem como nas extremidades e regiões de transição.

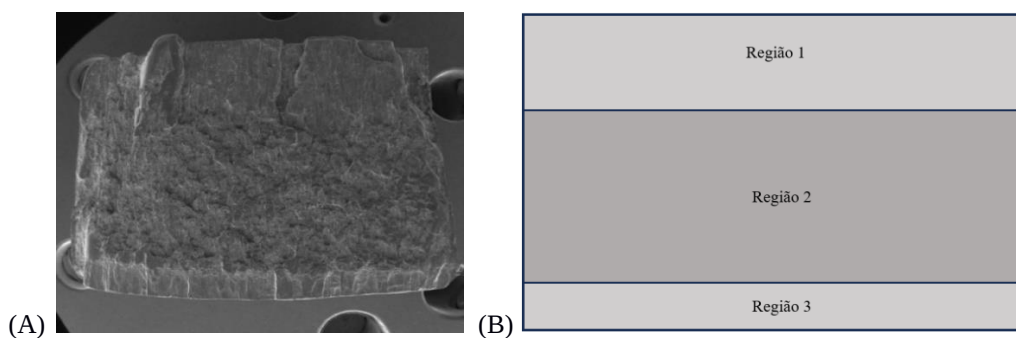


Figura 10: (A) Amostra utilizada no MEV; (B) Regiões de captura. (Autoria própria).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de iniciar a análise das imagens do MEV em busca de identificar a causa e o modo de falha, levou-se em consideração a condição de carregamento a qual a manga de eixo foi submetida. Esse componente recebeu dois esforços principais e de caráter crítico. O primeiro esforço é fruto do próprio peso do protótipo (3500 N), que gera uma força normal que é aplicada na ponta de eixo que conecta a roda com o montante.

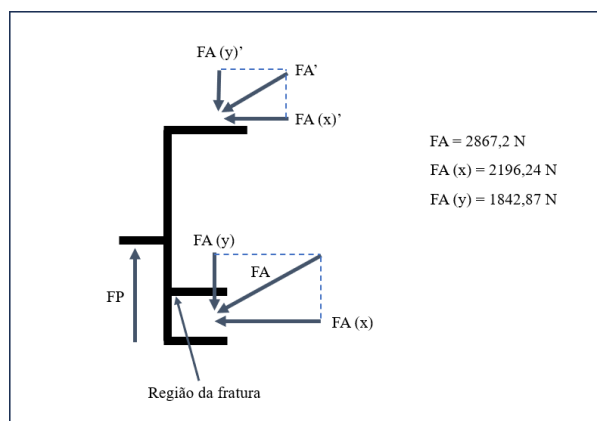


Figura 11: Diagrama de forças da manga de eixo. (Autoria própria)

O segundo esforço é fruto da componente de força exercida pelo amortecedor (18000 N/mm), que por sua vez varia com o curso do mesmo e é transmitida pelo braço de suspensão inferior até os olhais do montante. Pelas condições de trabalho de um mecanismo de suspensão, concluiu-se que o carregamento ao qual a manga de eixo foi submetida é dinâmico, visto que, por muitas vezes, o pneu perde contato com o solo, sendo esse o momento em que as componentes de força são reduzidas, o que resulta numa variação das componentes de força citadas acima conforme o tempo, em função dos obstáculos que o veículo precisa transpor e também das irregularidades conditas no terreno.

Assim, conforme a Figura 11, observou-se que o olhal do montante, que é objeto dessa análise, foi submetido a esforços de flexão oriundos da componente vertical da força exercida pelo amortecedor (FA (y)), bem como pela força peso aplicada no sentido oposto. Ainda, o olhal foi submetido a esforços de compressão, que se originaram da componente horizontal da força exercida pelo amortecedor (FA (x)). As componentes de reação exercidas no ponto de pivotamento superior foram desprezadas.

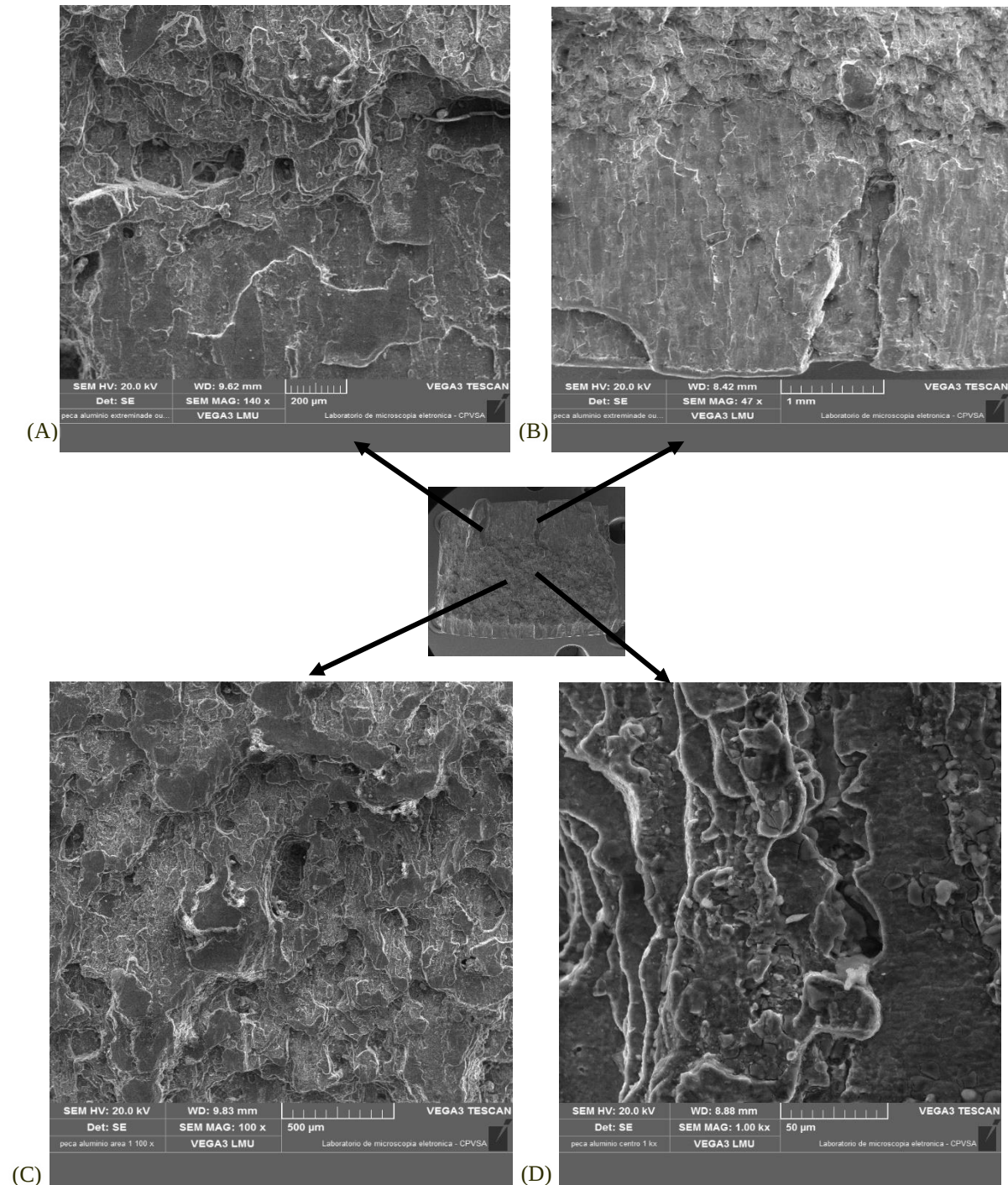


Figura 12: Imagens obtidas do MEV. As imagens (A), (B), (C) e (D), possuem ampliações de 140x, 1000x, 100x

e 47x. As escalas de ampliação são, respectivamente: 200 μm , 1 mm, 500 μm e 50 μm . (Autoria própria).

De posse das imagens obtidas por meio da análise fractográfica, pode-se observar duas regiões com características microscópicas distintas. Notou-se que as regiões 1 e 3, conforme a Figura 10 (B), apresentaram um aspecto morfológico distinto, em comparação com a região central da amostra (região 2), como fica evidente na Figura 10. Nas regiões 1 e 3, observou-se características que apontam para o mecanismo de fratura frágil transgranular, pois não apresentaram deformação plástica e seu aspecto superficial se mostrou plano, mostrando que a fratura ocorreu ao longo dos planos cristalográficos, conforme a Figura 12 (B). Tais características se assemelham as mostradas na Figura 3.

A região 1, por sua vez, apresentou características marcantes de uma fratura dúctil. Pode-se observar na figura 12 (C) e na Figura 10 (A) que a superfície da fratura apresentou aspecto fibroso e enrugado, indicando deformação plástica dos grãos durante a ruptura, além de um aspecto opaco, características de uma fratura dúctil conforme destaca [7]. Outro aspecto característico de uma fratura dúctil que foi observado nas imagens é a presença de *dimples*, que são as pequenas microcavidades de formato aproximadamente arredondado, como pode ser facilmente observado na Figura 12 (C).

Com base nas condições de carregamento apresentadas neste trabalho e nas imagens obtidas pela análise fractográfica, pode-se afirmar que a fratura ocorreu por conta dos esforços de flexão exercidos sobre o olhal do montante. O movimento alternado da suspensão ao transpor os obstáculos fez com que o esforço de flexão se alternasse nas duas extremidades do olhal, fazendo com que as regiões 1 e 3 falhassem de maneira frágil, conforme fica claro na Figura 10 (A).

Comparando as imagens do MEV com as de [6] e [11], pode-se afirmar que falha ocorreu, inicialmente, de modo frágil, tendo como ponto de iniciação da trinca a superfície superior do olhal, que apresentou imperfeições na forma de pequenas ranhuras e cavidades, que são resultado do longo período de uso do componente (Figura 8). Por meios das imagens obtidas da região 2, pode afirmar que a falha nessa região ocorreu de modo dúctil, conforme as imagens obtidas no MEV e a comparação com as imagens de [5]. Portanto, pode-se afirmar que a fratura iniciou de forma frágil e findou de forma dúctil, apresentando aspectos característicos de cada modo de falha em cada região.

Com base na árvore de falha e nas condições de carregamento exploradas foi possível filtrar os motivos que levaram a falha, sendo as microcavidades e imperfeições na superfície as hipóteses mais assertivas, como conta na árvore de falha.

5 CONCLUSÕES

Assim, por meio da análise fractográfica, foi possível identificar claramente as diferentes características microscópicas nas regiões 1, 2 e 3 da amostra, o que possibilitou a compreensão dos mecanismos de fratura presentes. As regiões 1 e 3 apresentaram características típicas de fratura frágil transgranular, com superfícies planas e ausência de deformação plástica, indicando que a ruptura se deu ao longo dos planos cristalográficos. Por outro lado, a região 1 mostrou um comportamento característico de fratura dúctil, com superfície fibrosa e alveolar (*dimples*), indicando que houve deformação plástica antes da falha.

A análise das condições de carga e das imagens obtidas por meio do MEV revelou que os esforços de flexão alternada aplicados sobre o olhal do montante foram os responsáveis pela falha. Observou-se que as regiões 1 e 3 apresentaram falha de caráter frágil, enquanto a região 2 apresentou uma fratura de natureza dúctil. A comparação das imagens obtidas com as referências da literatura confirmou essa conclusão, destacando que a falha começou de forma frágil devido às imperfeições superficiais do componente e, à medida que a carga foi progressivamente aplicada, a falha se transformou em uma fratura dúctil.

Portanto, conclui-se que a fratura ocorreu inicialmente de maneira frágil, com a falha sendo iniciada nas imperfeições presentes na superfície do componente, e se estendeu para um modo de fratura dúctil à medida que a trinca avançou. As hipóteses mais assertivas para a falha são as relacionadas às microcavidades e imperfeições na superfície, conforme evidenciado pela árvore de falha. A combinação de ambos os modos de falha reflete a complexidade do comportamento do material sob os esforços de flexão e reforça a importância de considerar as condições de uso e as características microscópicas das regiões envolvidas.

Como propostas de solução para evitar futuras falhas dessa natureza, propõe-se, uma revisão dos cálculos para que haja um aumento no raio do filete, região onde a falha ocorreu, visto que o mesmo pode atuar como um concentrador de tensão favorecendo a fratura. Propõe-se também um melhor acabamento superficial no componente, visando eliminar microcavidades, microfendas e outros defeitos que podem atuar como pontos de partida para trincas. Por fim, sugere-se a implementação de uma manutenção preventiva, onde o componente passará por uma avaliação de sua integridade, com o objetivo de prever possíveis falhas.

Como sugestão para um estudo mais aprofundado sobre este tema, sugere-se a realização de ensaios de fadiga com o intuito de avaliar a vida útil do componente quando submetido a cargas de natureza cíclicas.

6 AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha gratidão a Deus, por ter me dado força e a capacidade de chegar até este momento, sempre estando comigo. Em seguida, gostaria de agradecer à minha família, por sempre me cobrir de apoio e por ter me dado todas as condições necessárias para cursar minha graduação, em especial ao meu pai, Francisco Milton Valente da Silva, e à minha mãe, Adriana da Silva Nogueira Valente.

Agradeço ao projeto Cactus BAJA, por ter me fornecido o componente que foi tema deste estudo, além de proporcionar o nível de conhecimento necessário para fazê-lo.

Agradeço também ao meu orientador Francisco Edson Nogueira Fraga, por ter aceitado prontamente o desafio de me orientar neste trabalho, auxiliando-me em todas as etapas.

Por fim, gostaria de agradecer a Bruno Caio, técnico de laboratório do SEPAS, onde foi realizada a análise fractográfica utilizada neste estudo.

7 REFERÊNCIAS

- [1] GONÇALVES, J.M. *Análise de Falhas em Engenharia*. [S. l.]: Blucher, 2010.
- [2] SILVA, R. M.; COSTA, L. M. *Desenvolvimento e Avaliação de Veículos Off-Road*. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2015.
- [3] ALMEIDA, F.; RIBEIRO, P. S. *Análise e Diagnóstico de Falhas: Ferramentas e Métodos*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2018.
- [4] SAE BRASIL. *Regulamento Baja SAE Brasil - Emenda 6*. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.saebrasil.org.br>. Acesso em: [17/03/2025].
- [5] CALLISTER, W. D. JR. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Rio de Janeiro, RJ: Editora LTC, 2008.
- [6] ASM International. *ASM Handbook, Volume 12: Fractography*. 10. ed. Materials Park: ASM International, 2004.
- [7] ANDERSON, T.L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [8] SHIGLEY, J. E. *Elementos de máquinas*. 9. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2011.
- [9] ABNT. *NBR ISO 31010:2012 - Gestão de riscos - Técnicas de avaliação de riscos*. Rio de Janeiro, 2012.
- [10] DEDAVID, Berenice; GOMES, Carmem; MACHADO, Giovanna. *MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA: Aplicações preparação de amostras*. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60 p. v. 1.
- [11] PELLICCIONE, André da Silva; DA SILVA, Paulo Sérgio Carvalho Pereira. *Análise de falhas: Trincas e fraturas em equipamentos metálicos*. 1. ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2024. Atlas.
- [12] TRACTIAN. *Análise da Árvore de Falhas*. Disponível em: <https://traction.com/blog/analise-da-arvore-de-falhas>. Acesso em: [11/02/2025].
- [13] CARVALHO, Henrique. *Análise da árvore de falhas. Vida de Produto*, 2020. Disponível em: <https://vidadeproduto.com.br/analise-da-arvores-de-falhas/>. Acesso em: 15 jan. 2025.