

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DÉBORA VASCONCELOS PACHECO

**ANÁLISE DE FALHA DE UMA TRIZETA UTILIZADA NO PROTÓTIPO OFF-
ROAD CEFASST BAJA SAE**

BELO HORIZONTE

2023

DÉBORA VASCONCELOS PACHECO

**ANÁLISE DE FALHA DE UMA TRIZETA UTILIZADA NO PROTÓTIPO OFF-
ROAD CEFAST BAJA SAE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. André Guimarães Ferreira

BELO HORIZONTE

2023

DÉBORA VASCONCELOS PACHECO

ANÁLISE DE FALHA DE UMA TRIZETA UTILIZADA NO PROTÓTIPO OFF-ROAD CEFAST BAJA SAE

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 07/12/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira - Orientador

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. Me. Humberto Barros de Oliveira

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus e à Meishu-Sama por me concederem perseverança e força ao longo de toda a minha jornada. Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Cléber e Guilhermina, cujo apoio e incentivo foram alicerces fundamentais para as minhas conquistas. Aos meus irmãos, Fernanda e Marcelo, agradeço pela amizade e atenção dedicadas sempre que necessitei.

Não posso deixar de mencionar a importância do meu professor orientador, André, que contribuiu de maneira inestimável ao longo de todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Da mesma forma, expresso minha sincera gratidão à Professora Elaine, cuja orientação foi essencial durante a fase prática e técnica deste estudo.

À Equipe Cefast Baja SAE, agradeço por ceder o componente de estudo deste trabalho e por auxiliar-me em todas as dúvidas e questionamentos surgidos. Meus agradecimentos se estendem a todos os amigos e amigas, desde o ensino médio até o curso de graduação, passando pelo time Baja e pelo intercâmbio, que compartilharam os inúmeros desafios que enfrentei. Seu espírito acolhedor e colaborativo tornou meus dias mais divertidos e significativos.

Por fim, expresso minha gratidão ao CEFET-MG, ao corpo docente e aos demais funcionários, cujo comprometimento em fornecer ensino, pesquisa e oportunidades de extensão com qualidade e excelência foi fundamental para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

RESUMO

A competição Baja SAE é uma competição estudantil nacional e internacional em que equipes de engenharia projetam e constroem veículos capazes de superar obstáculos *off-road*. A trizeta é um componente fundamental destes veículos, porém, a ocorrência de falhas tem sido observada, prejudicando o desempenho na competição. Para investigar as causas das falhas, foram empregadas diversas técnicas de análise, incluindo análise metalográfica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise por elementos finitos (FEA). Os resultados obtidos por meio dessas análises revelaram que existem 3 peças de maior fragilidade do componente, sendo que a arruela é a peça determinante para a falha da trizeta. Com base nessas informações, a recomendação para o aprimoramento do projeto é optar pela aquisição de uma trizeta mais robusta e que apresente uma maior espessura de parede, visando aumentar a confiabilidade do componente e o subsequente desempenho da equipe nas competições Baja SAE.

Palavras chave: Trizeta. Análises de Falha. Competição Baja SAE.

ABSTRACT

The Baja SAE competition is a national and international student competition in which engineering teams design and build vehicles capable of overcoming off-road obstacles. The trizeta is a fundamental component of these vehicles, however, the occurrence of failures has been observed, compromising performance in competition. To investigate the causes of failures, several analytical techniques were used, including metallographic analysis, scanning electron microscopy (SEM) and finite element analysis (FEA). The results obtained through these analyzes revealed that there are 3 parts of the component that are most fragile, with the washer being the determining part for the failure of the trizeta. Based on this information, the recommendation for improving the project is to opt for the acquisition of a more robust trizeta with a greater wall thickness, aiming to increase the reliability of the component and the subsequent performance of the team in the Baja SAE competitions.

Keywords: Trizeta. Analysis. Baja SAE competitions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ampliações referentes a observação da fratura em diferentes vistas	20
Figura 2 – Análise MEV da superfície da fratura e da região estriada	20
Figura 3 – Detalhamento da biela e respectivas identificações utilizadas para a análise	22
Figura 4 - Distribuição de tensão Von-mises da simulação FEA	23
Figura 5 – Fluxograma com as etapas do projeto	24
Figura 6 – Componente de estudo: trizeta	24
Figura 7 – Vista explodida da transmissão	25
Figura 8 – Traseira do protótipo CB11	25
Figura 9 – Esboço do componente de estudo: trizeta	26
Figura 10 - Exemplo de uma pista de testes em que o protótipo é testado	26
Figura 11 – Representação das áreas de medição de cada rolamento	28
Figura 12 – Posição da amostra durante o procedimento de lixamento	28
Figura 13 – Etapas da análise estrutural estática pelo <i>software Ansys</i>	29
Figura 14 –Malha gerada pelo <i>software Ansys</i> para cada uma das peças	30
Figura 15 – Fotografia retirada do eixo que estava desmontado	32
Figura 16 – Fotografia retirada dos eixos que estavam montados	33
Figura 17 – Imagens obtidas no MEV por peças	34
Figura 18 – Imagens obtidas no MEV da arruela	36
Figura 19 – Imagens MEV de aços temperados	37
Figura 20 – Imagens obtidas no MEV do anel elástico	38
Figura 21 – Parafuso obtido em um processo de forjamento.	38
Figura 22 – Imagens obtidas no MEV do rolamento	39
Figura 23 – Micrografias MEV de um aço inoxidável martensítico temperado	40
Figura 24 – Variações dos valores encontrados no ensaio de microdureza por amostra	41
Figura 25 – Resultado da simulação numérica obtido para a arruela	42
Figura 26 – Resultado da simulação numérica obtido para o anel elástico	43
Figura 27 – Resultado da simulação numérica obtido para o rolamento	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Identificação das 6 peças de maior fragilidade do componente trizeta	27
Tabela 2 – Informações sobre a malha gerada para cada peça	30
Tabela 3 – Esforços aplicadas por cada peça analisada	31
Tabela 4 – Resultado da medição dos rolamentos	35
Tabela 5 – Valores médios do ensaio de microdureza por peça	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
EDX	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio X
FEA	Análise de Elementos Finitos
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PDCA	<i>Plan, Do, Check and Act</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo Geral	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Definição de qualidade, falha e análise de falha	13
3.2	Técnicas para a análise de falhas	14
3.3	Análise de modos de falha e seus efeitos (FMEA)	16
3.4	Análises visuais, metalográficas e ensaios mecânicos	17
3.5	Análise de falhas em componentes mecânicos	19
4	MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1	Material	24
4.2	Caracterização da trizeta	26
4.2.1	<i>Análise fractográfica</i>	27
4.2.2	<i>Análise da microestrutura</i>	28
4.2.3	<i>Ensaio de microdureza</i>	29
4.3	Simulação numérica	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1	Caracterização da trizeta	32
5.1.1	<i>Análise Fractográfica</i>	32
5.1.2	<i>Análise microestrutural</i>	35
5.1.3	<i>Ensaio de microdureza</i>	40
5.2	Simulação numérica	42

6. CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

No campo da engenharia, a análise de falhas desempenha um papel crucial na identificação e compreensão das causas de falhas em componentes mecânicos. Essa análise é fundamental para o desenvolvimento de projetos mais confiáveis e seguros, principalmente em aplicações de alto desempenho, como os veículos *off-road* utilizados nas competições universitárias Baja SAE - *Society of Automotive Engineers*. A competição Baja SAE é uma competição estudantil internacional em que equipes de engenharia projetam, constroem e competem com veículos *off-road*, seguindo regras técnicas e de desempenho. Durante as competições, os veículos são testados em provas práticas e avaliados em critérios como relatórios técnicos e trabalho em equipe.

No Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), a equipe de competição dessa categoria denomina-se Cefast Baja SAE. É uma equipe tradicional e considerada umas das 10 melhores equipes do Brasil. Contudo, atualmente enfrenta um problema com a quebra recorrente da trizeta, componente mecânico responsável por transmitir torque e permitir o movimento angular nas articulações dos eixos. Neste contexto é fundamental realizar uma análise abrangente das falhas que ocorrem na trizeta utilizada no protótipo Cefast Baja SAE. Para isso, são empregadas técnicas de análise metalográfica, ensaio de microdureza e análise computacional por elementos finitos.

A análise metalográfica permite examinar a microestrutura da trizeta e identificar possíveis descontinuidades, inclusões ou regiões suscetíveis a falhas. Isso fornece informações valiosas sobre a qualidade do material utilizado e os processos de fabricação empregados. Já o ensaio de microdureza possibilita o conhecimento da dureza da cada material, auxiliando na identificação das fases e constituintes presentes. Por fim, a análise computacional por elementos finitos possibilita simular o comportamento estrutural da trizeta sob diferentes condições de carga e determinar os níveis de tensões, deformações e deslocamentos. Com base nos resultados dessas análises, podem ser propostas recomendações e melhorias no projeto, materiais ou processos de fabricação da trizeta, visando aumentar sua confiabilidade, resistência e desempenho da equipe Cefast Baja SAE nas competições.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é identificar a causa da falha recorrente na trizeta utilizada no protótipo CB11 da equipe de competição Cefast Baja SAE.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Analisar a superfície de falha, inferindo sobre possíveis mecanismos que ocasionaram as deformações;
- Identificar a microestrutura e propriedades mecânicas do componente por meio da caracterização da peça;
- Verificar qualitativamente, por análise de elementos finitos, as possíveis forças atuantes no componente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Definição de qualidade, falha e análise de falha

De acordo com Kotas (1995), a definição de qualidade está associada à satisfação das necessidades do cliente, como também à consideração dos requisitos técnicos e de engenharia essenciais para o projeto e produção do produto. Na mesma referência, Kotas estabelece que o termo falha significa "a perda da função de um componente, subconjunto ou sistema como um todo, para satisfazer uma ou mais das exigências de desempenho estabelecidas", além de subdividi-las em falhas de natureza física (quebra ou fissuração de um componente) e de natureza funcional (desempenho abaixo do esperado em relação a critérios de qualidade). Por fim, ele ressalta a importância de conhecer o que ocasiona as falhas para que se possa prevenir a ocorrência de tais problemas futuros (KOTAS, 1995).

Para Juran (2018), o termo qualidade tinha dois significados quando orientados a um produto, processo ou serviço: possuir as características que satisfazem a necessidade e expectativas do cliente e não dispor de falhas. Ele complementa que a qualidade deve ser vista como um processo de melhoria contínua, de modo que a organização entenda as necessidades do cliente e elimine as causas de defeitos e falhas do produto ou processo. Além disso, Juran destaca a importância de utilizar ferramentas estatísticas e metodológicas como o ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) para supervisionar e garantir a melhoria da qualidade.

O significado de falha é "a ausência de conformidade com as especificações ou requisitos, ou a ocorrência de qualquer evento indesejado". Além disso, a falha pode ocorrer durante qualquer fase do ciclo de vida de um produto ou serviço, sendo importante entender sobre as causas da falha e evitar que elas venham a ocorrer futuramente. Por fim, Juran salienta que para o melhor conhecimento e identificação da causa raiz da falha é de suma importância uma abordagem sistêmica destas por meio de ferramentas e técnicas de análise de falhas (JURAN, 2018).

De acordo com a norma internacional ISO 9000 (2015), a análise de falhas é definida como "uma técnica para identificar e analisar as causas de falhas, para tomar as medidas necessárias para evitar a sua repetição". Para Bazu (2011), a análise de falhas consiste na investigação e determinação da causa da falha em um componente, dispositivo ou sistema, fornecendo soluções capazes de prevenir a recorrência desta (BAZU, 2011; ISO 9000, 2015).

Vanden Heuvel (2008) definiu a análise de falhas como "um processo estruturado e sistemático que busca a causa raiz de uma falha ou problema, com o objetivo de desenvolver e implementar soluções eficazes e permanentes". Já na concepção de Subramanian (2011), a análise de falhas é um método capaz de identificar a falha em componentes eletrônicos, determinando meios para se prevenir que ela ocorra futuramente (SUBRAMANIAN, 2011; VANDEN HEUVEL, 2008).

Assim, em termos gerais, a análise de falhas consiste em um processo sistemático de investigação da causa raiz de uma falha, envolvendo a coleta e análise dos dados, identificação do problema e proposição de soluções que resolvam ou minimizem a falha. Este estudo pode ser realizado em diversos contextos, incluindo engenharia, aviação, manufatura, dentre outros.

Em algumas referências mais recentes os autores comentam sobre a importância da análise de falhas. Smith *et al.* (2019) afirmam que a análise de falha é essencial para a identificação das causas de um problema, prevenção contra eventuais recorrências e melhoria de eficácia e eficiência dos processos. Para Mourelle e Ortega (2017) esta técnica é fundamental para precaver incidentes industriais, aprimorar a segurança e moderar os custos associados a falhas.

Já Pahl *et al.* (2013) atestam que a análise de falha faz parte do processo de design, sendo importante ao permitir a identificação dos riscos e problemas associados a um produto ou sistema, além de possibilitar o uso de medidas preventivas para minimizá-los. Dessa forma, resumidamente, a importância da análise de falhas é evidenciada por ela garantir a qualidade e confiabilidade de produtos e sistemas ao prevenir eventuais falhas, além de evitar ou minimizar os riscos e custos associados a falhas e defeitos (PAHL *et al.*, 2013).

3.2 Técnicas para a análise de falhas

No contexto atual tem-se diversas técnicas de análise de falhas indicadas para diferentes aplicações, de acordo com o contexto em que essa falha ocorreu e o respectivo problema que foi originado. Analogamente, existem autores que discorrem sobre essas técnicas com focos diferentes, de acordo com o objeto de estudo e as experiências próprias. Assim, enquanto alguns enfatizam a importância da análise de causa raiz, outros podem se concentrar em análises estatísticas.

Dentre as análises estatísticas, destaca-se a análise de árvores de falhas, a análise de causa e efeito (análise de Ishikawa) e a análise de Pareto. Desenvolvida em 1961, por um engenheiro da Boeing, a análise de árvores de falhas é capaz de identificar a causa da falha em sistemas complexos ao tratar a falha, inicialmente como um único sistema e, posteriormente, analisar os componentes individualmente. Assim, ela tem aplicação viável na identificação de combinações de falhas que podem resultar em uma falha maior do sistema (WATSON, 1961).

No caso da análise de causa e efeito, conhecida como análise de Ishikawa ou popularmente como espinha de peixe, a utilização ocorre em processos de melhoria da qualidade e resolução de problemas, pois organiza as informações de possíveis causas em categorias, de modo a possibilitar a identificação da causa raiz. Já a análise de Pareto, desenvolvida por Vilfredo Pareto em 1896 é uma ferramenta que se baseia na classificação e priorização dos problemas mais significativos, sendo uma análise fundamentada na análise da frequência de ocorrência das falhas (FALCONI, 1995; ISHIKAWA, 1992).

Outra técnica amplamente utilizada para a análise de falhas é a simulação numérica, como elementos finitos e modelos analíticos. A grande vantagem desse tipo de técnica é a capacidade de simular virtualmente as condições de uso que o componente é submetido, utilizando as características geométricas e mecânicas do componente. Com isso, é possível avaliar o desempenho do componente sob diferentes condições de carga e detectar possíveis pontos críticos ou regiões de falha (TAYLOR, 2013; RICHARDSON, 2018).

De maneira mais detalhada, a simulação numérica é capaz de solucionar problemas complexos de engenharia, como dinâmica de fluidos e transferência de calor, ao modelar em geometria tridimensional o componente, aplicar as condições de contorno pertinentes e utilizar o tamanho de malha adequada para a análise. Realizando essas etapas, é possível discretizar as equações de campo e resolvê-las numericamente para obter as informações sobre o comportamento deste sistema (MACKERLE, 2014).

Análises metalográficas, ensaios mecânicos e técnicas de caracterização são indicadas para analisar falhas em componentes mecânicos. Esses procedimentos além de permitirem observar a microestrutura do material, a identificação da ocorrência de trincas, inclusões e segregações, possibilita avaliar a resistência mecânica do componente, por exemplo, tenacidade, dureza e ductilidade. Também é possível fazer análises químicas e espectroscopia no componente que apresentar falhas. Dessa forma, é possível identificar a composição química do material, avaliar seu grau de pureza e homogeneidade. Há ainda referências que

definem análises para falhas específicas, como análise de falha por corrosão, por deformação e por fadiga. Estas englobam as técnicas como metodologia, incluindo análise químicas, de tensões, fraturas, ensaios não destrutivos e metalografia (JAMES E MCNANEY, 2019; RICHARDSON, 2018; SULLIVAN, 2012).

3.3 Análise de modos de falha e seus efeitos (FMEA)

A *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) foi desenvolvido na década de 40 pelo engenheiro americano da Lawrence D. Miles. Naquele período, ele afirmava que a qualidade não deveria ser baseada apenas na inspeção, mas sim era necessário que se criasse um método que aprimorasse o processo e obtivesse qualidade. Desde então, a FMEA viabilizou o estudo mitigação de falhas e melhor confiabilidade em equipamentos e sistemas complexos (HOLTZMAN, 2015; MCDERMOTT, 2013).

Algumas referências abordam a análise FMEA como uma técnica de avaliação e priorização de riscos referentes a um equipamento, processo ou sistema, compreendendo a identificação dos potenciais modos de falha, a avaliação da gravidade e a probabilidade de ocorrer cada falha. De posse desses dados, é possível adotar medidas de prevenção que minimizem os efeitos de falha e aprimorem a qualidade do produto (ALISSON, 1999; ANTONY E KUMAR, 2013; BEN-DAYA, AL-ABDULLAH e AL-AHMARI, 2020; DAVIS, 2020).

A metodologia FMEA consiste na análise de um componente ou uma etapa de um processo, podendo ser aplicada em qualquer tipo de sistema, desde processos de fabricação, até sistemas de controles de qualidade. Esse método é de suma importância, pois permite prevenção de problemas, uma vez que a análise é feita anteriormente ao processo de produção efetivo. Além disso, esta técnica auxilia as organizações a serem mais eficientes, rentáveis e com melhor desempenho, ao evitar que a empresa sofra com possíveis recalls de produtos e perda de receita (KIRITSIS e HADJIDEMA 2017; ZHANG e ZHOU, 2021).

Por ser uma técnica sistemática, a análise FMEA possui diferentes etapas que devem ser seguidas em ordem para utilizá-la. Estas etapas são definidas a seguir na ordem em que devem ser executadas:

- a) A primeira etapa baseia-se na identificação e listagem de todas as etapas e componentes que compõem o produto ou processo que será analisado.

- b) Em seguida, deve-se identificar todos os modos de falha potenciais que podem acontecer no componente ou em cada etapa do processo, ainda que estes sejam improváveis de ocorrer
- c) A próxima etapa é avaliar quão grave são os efeitos das falhas relativos ao impacto na qualidade, na segurança e na eficiência do produto ou processo.
- d) Após avaliar a gravidade dos efeitos das falhas, é necessário avaliar a probabilidade de ocorrência de cada modo de falha, analisando os fatores que aumentam ou reduzem a probabilidade em questão.
- e) Logo após, avalia-se a probabilidade de detectar ou prevenir uma falha, utilizando uma escala numérica de 1 a 10, sendo 1 pouco provável de detectar ou prever a falha e 10 muito provável que a falha seja detectada ou prevenida.
- f) Por fim, com base nas avaliações de gravidade, probabilidade e detecção, define-se medidas preventivas para minimizar ou eliminar os efeitos das falhas potenciais, como mudanças no processo e treinamento de funcionários.

Essas etapas devem ser realizadas na sequência apresentada, iniciando na identificação do processo e terminando com a definição das medidas preventivas. Além disso, as etapas da análise devem ser documentadas, de modo que as informações sejam de fácil acesso para os integrantes da organização (CHEN, GAO e ZHOU, 2021; GUO E YUAN, 2020; KIRITSIS e HADJIDEMA, 2017).

3.4 Análises visuais, metalográficas e ensaios mecânicos

A análise visual consiste em visualizar o material, avaliando a superfície e possíveis falhas apresentadas no componente seja por observação direta (a olho nu) ou microscópica (com auxílio de equipamentos óticos). A análise realizada a olho nu ou análise direta realiza uma inspeção capaz de detectar defeitos superficiais, por exemplo, trincas, fraturas e tipos, arranhões e desgastes. Para análises de fraturas, especificamente, existe a análise fractográfica, cujo técnica é alicerçada pela observação e caracterização de marcas de fraturas,

analisando sua morfologia e geometria (CALLISTER e RETHWISCH, 2018; TORIBIO e TORRALBA, 2006).

No caso das análises microscópicas utiliza-se equipamentos capazes de fornecer com mais detalhes a superfície, sendo possível avaliar a microestrutura do material e a detecção de defeitos menores. Um exemplo da análise microscópica é a microscopia eletrônica de varredura (MEV), que por meio de um feixe de elétrons é capaz de escanear e produzir imagens da superfície do material (PRADO, 2017; GOMES, 2023).

As análises metalográficas, por sua vez, são primordiais para a análise de defeitos em componentes mecânicos, pois a partir delas é possível compreender as propriedades e comportamento dos materiais. Essa técnica de análise abrange observações da superfície do material de ordem macro e micro, as quais fundamentam as conhecidas técnicas de macrografia e micrografia. O ponto em comum dessas análises é a preparação das amostras, presença de ataque químico e posterior análise visual. Já a divergência se encontra na ampliação visual que utilizam e subsequentes estruturas superficiais capazes de serem identificadas no componente. Enquanto a macrografia possui ampliações de baixa magnificação que possibilitam a identificação de inclusões, trincas e segregação, a micrografia conta com ampliações de altíssima magnitude que permitem a visualização da microestrutura do material, sendo possível identificar grãos, fases e precipitados (BRANDON e KAPLAN, 2001; LUYCKX *et al.*, 2006).

Os ensaios mecânicos são de extrema importância para qualidade e segurança dos componentes mecânicos. Esses ensaios consistem em testes realizados em um dado material para avaliar as propriedades mecânicas, como resistência, tenacidade e dureza, além de auxiliar na investigação para de possíveis falhas presente no produto. Para avaliar a dureza, como citado anteriormente, existe o ensaio de dureza que determina a resistência do material à deformação plástica localizada. Existe diferentes métodos para se realizar esse ensaio, por exemplo, Brinell, Vickers e Rockwell, que se diferenciam pela forma e tamanho da indentação feita no material (CALLISTER e RETHWISCH, 2018; DIETER e BACON, 2018).

O ensaio de fadiga, por sua vez, avalia a capacidade de um material em suportar cargas repetidas sem falhar. Geralmente, aplica-se esse ensaio em componentes submetidos a ciclos de carga repetitiva, como em estruturas sujeitas a vibrações. Para o ensaio de líquidos

penetrantes, o objetivo é detectar descontinuidades superficiais no componente através da análise da capilaridade de um líquido penetrante. A metodologia desse ensaio consiste na aplicação de um líquido penetrante na superfície, este líquido irá penetrar em possíveis fissuras e trincas presentes na superfície. Logo após, remove-se o excesso de líquido penetrante e adiciona um revelador que irá destacar as descontinuidades (ASTM E466, 2015; ASTM E165, 2020).

Além das técnicas citadas, para se analisar um material também é preciso verificar qual a composição química e avaliar o grau de pureza. Para isso, existem as análises químicas que determinam a composição química do material através de metodologias que contam com análises qualitativas e quantitativas dos elementos presentes no produto. Por sua vez, dentre as análises químicas destacam-se as técnicas de espectroscopia que utilizam diferentes radiações para identificar os elementos presentes na amostra, por exemplo, a espectroscopia de infravermelho por meio da absorção da radiação infravermelha reconhece compostos orgânicos e inorgânicos, possibilitando quantificar a presença de determinados componentes dos grupos funcionais das moléculas (SKOOG *et al.*, 2017; VOGEL, 2013).

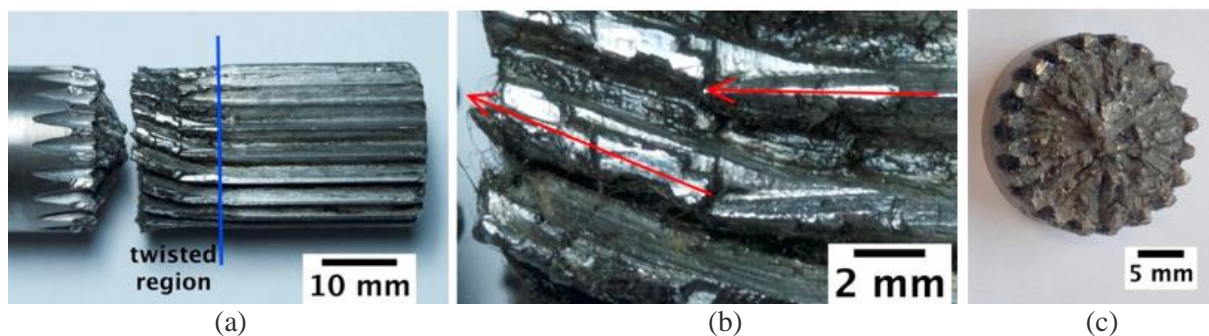
3.5 Análise de falhas em componentes mecânicos

Diversos trabalhos apresentam discussões sobre análises de falhas em componentes mecânicos, dentre eles vários estão presentes na revista *Engineering Failure Analysis*. Nascimento *et al.* (2021) abordaram a falha prematura de um semi-eixo utilizado em um protótipo desenvolvido para a Formula SAE – competição entre estudantes de engenharia de todo mundo que tem como objetivo o projeto e construção de um veículo de corrida tipo fórmula. O semi-eixo em questão apresentou a falha após percorrer 100 km em um trecho que induz um torque crescente, sendo que a vida útil do componente era de 500 km. Assim, este foi analisado utilizando caracterização microestrutural, mecânica e fractografia para determinar a causa da falha.

Ao observar as estrias da peça semi-eixo foi possível notar que ocorreu uma fratura dúctil devido à sobrecarga de torção com ângulo aproximado de 20° (NASCIMENTO *et al.*, 2021). Na Figura 1 são apresentadas as imagens do componente fraturado com suas respectivas ampliações. Além disso, com o resultado da análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi possível observar a presença de várias pequenas trincas transversais e uma grande trinca longitudinal nas estrias, Figura 2. Já por meio do ensaio de tração e da composição

química encontrada concluiu-se que foi utilizado o aço AISI/SAE 4140, enquanto a aplicação requeria um aço de maior resistência beneficiado, como o aço AISI/SAE 4340 temperado e revenido. (NASCIMENTO *et al.*, 2021)

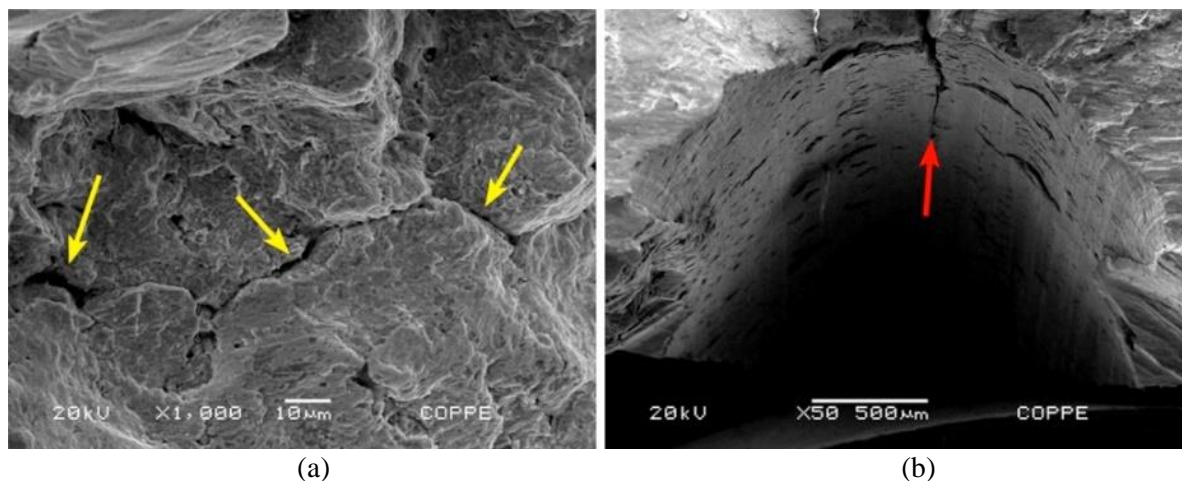
Figura 1 – Ampliações referentes a observação da fratura em diferentes vistas



(a) Fratura na seção estriada do semi-eixo. (b) Visão detalhada da região torcida com as setas vermelhas indicando o alinhamento da parte superior das estrias. (c) vista transversal da superfície de fratura.

Fonte: Nascimento et al. (2021)

Figura 2 – Análise MEV da superfície da fratura e da região estriada



(a) Trincas secundárias observadas na superfície de fratura próximo à borda (setas amarelas). (b) região da estria com fissurações transversais e uma fissura longitudinal (seta vermelha).

Fonte: Nascimento et al. (2021)

Por fim, foi realizada uma análise por elementos finitos considerando tensões de contato e atrito, lubrificação do conjunto e o coeficiente de atrito. Como resultado, notou-se uma alta

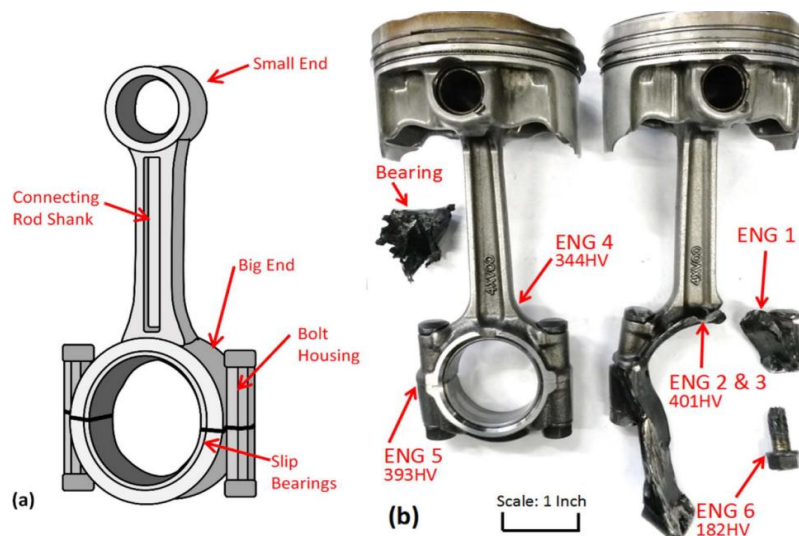
concentração de tensão localizada na região do filete das estrias e a tensão máxima ocorrendo na face dos dentes estriados que ficam em contato com a junta homocinética. Já o limite de escoamento do semi-eixo do aço AISI/SAE 4140 foi superado pelos valores de tensão efetiva calculados, o que corrobora as observações de desgaste nas imagens obtidas por MEV (NASCIMENTO *et al.*, 2021).

Dessa forma, os autores do artigo concluíram que o uso do aço AISI/SAE 4140 ao invés do aço AISI/SAE 4340 beneficiado teve influência na falha prematura do componente, por apresentar propriedades abaixo das especificadas. Analiticamente, a causa da falha do semi-eixo ocorreu por uma combinação de fadiga torcional e sobrecarga, evidenciado pelos os fios da estria torcidos e a superfície da fratura. Já as trincas de fadiga nucleadas na raiz da ranhura, reduziram a capacidade de carga do componente (NASCIMENTO *et al.*, 2021).

Yousif e Alrtashed (2014) apresentam o estudo da causa raiz da falha de uma biela defeituosa de um motor de motocicleta. Para isso, foram realizadas inspeções na superfície da fratura, na microestrutura e na dureza do componente. Além disso, fez-se uso de análise de elementos finitos para validar as análises práticas e evitar que ocorram falhas futuras dessa espécie (YOUSIF e ALRASHED, 2014).

No referido trabalho, foram coletadas 6 amostras da biela que falhou e de uma outra biela intacta identificadas com o nome de ENG 1 a 6 (Figura 3). Os resultados da análise fractográfica evidenciaram pontos de calor presentes dentro do material que contribuíram para a falha. Para a análise MEV a geometria da fratura encontrada revelou uma morfologia que sugere um modo de fratura frágil, o qual é característica de falhas por fadiga. As análises por espectroscopia de energia dispersiva de raio X (EDX) nas regiões 1, 2 e 3 constataram a ausência de enxofre, indicando a possibilidade do óleo do motor ter sido sulfurado devido a um defeito de vedação no cilindro. Já o ensaio de dureza obteve uma média de 393HV para a porção intacta dos parafusos, enquanto para o parafuso fraturado encontrou-se 182HV, revelando um possível defeito primário de fabricação (YOUSIF e ALRASHED, 2014).

Figura 3 – Detalhamento da biela e respectivas identificações utilizadas para a análise

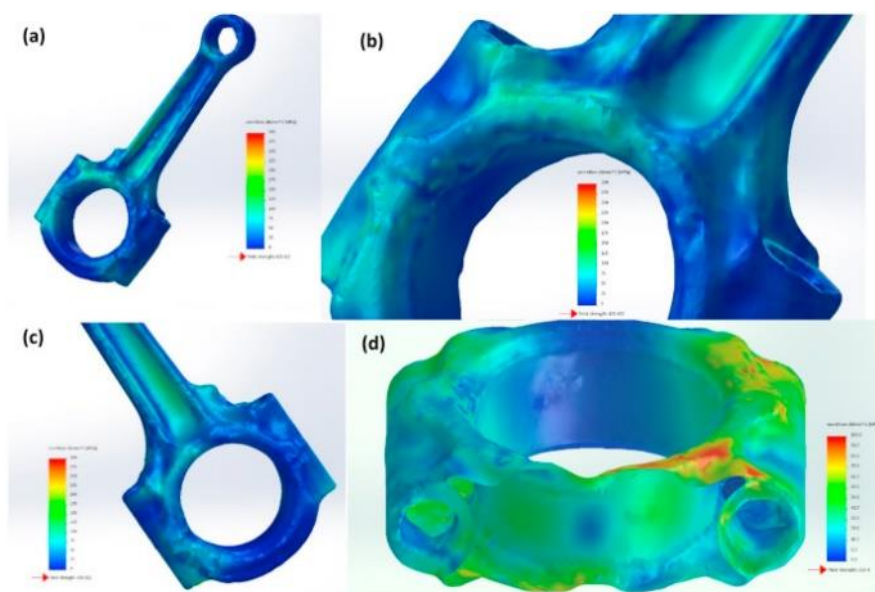


(a) Descrição da geometria que define uma biela. (b) Comparativo entre uma biela intacta e a biela que falhou, além da identificação das partes que foram analisadas

Fonte: Yousif e Alrashed (2014)

Por fim, foi realizado no trabalho descrito uma análise de elementos finitos (FEA) para determinar a distribuição de tensão na geometria intacta da biela. Observando a tensão encontrada na simulação FEA percebe-se que a região de tensão máxima coincide com a região de fratura, entre a extremidade maior e a haste, Figura 4(a). Além disso, a tensão de tração média encontrada no ponto de falha possui um limite de escoamento muito abaixo do aço-liga, caracterizando uma fratura por fadiga, Figura 4 (b) e (c). Também pela análise FEA, realizada por Yousif e Alrashed (2014), foi possível notar que as tensões máximas de tração foram localizadas na superfície da extremidade maior, confirmando que a fissuração superficial foi a principal causa da falha, Figura 4(d).

Figura 4 – Distribuição de tensão Von-mises da simulação FEA



(a) Vista frontal da biela. (b) Ampliação da extremidade maior da biela, evidenciando alta concentração de tensões. (c) Vista traseira da extremidade maior da biela. (d) Vista em corte transversal da extremidade maior da biela.

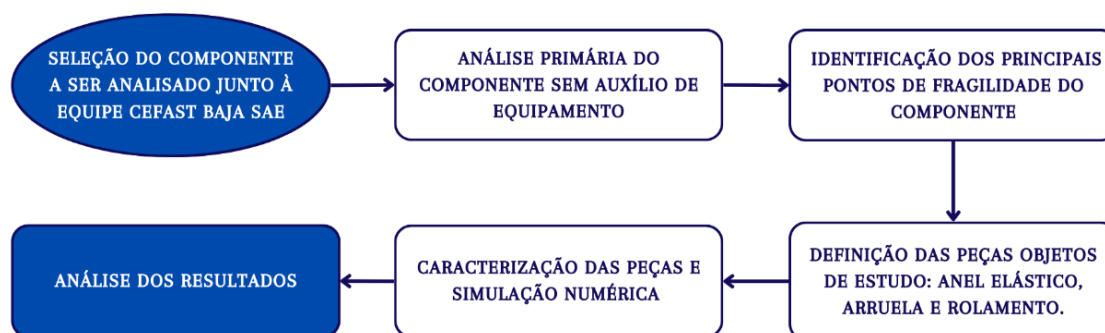
Fonte: Yousif e Alrashed (2014)

Dessa forma, conclui-se que a falha ocorreu devido a soma dos fatores: acúmulo de incrustações no aço que gerou a formação de microtrincas que se propagaram durante o carregamento de fadiga; inclusões frágeis de sulfeto presentes na superfície da fratura, originadas pelo óleo sulfurado ou processo de condicionamento inadequado; parafuso utilizado com dureza inadequada, acarretando no alongamento excessivo que originou uma tensão de impacto cíclica na superfície do mancal (YOUSIF e ALRASHED, 2014).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido conforme apresentado na Figura 5, onde são mostradas as etapas realizadas.

Figura 5 – Fluxograma com as etapas do projeto



Fonte: Próprio autor

4.1 Material

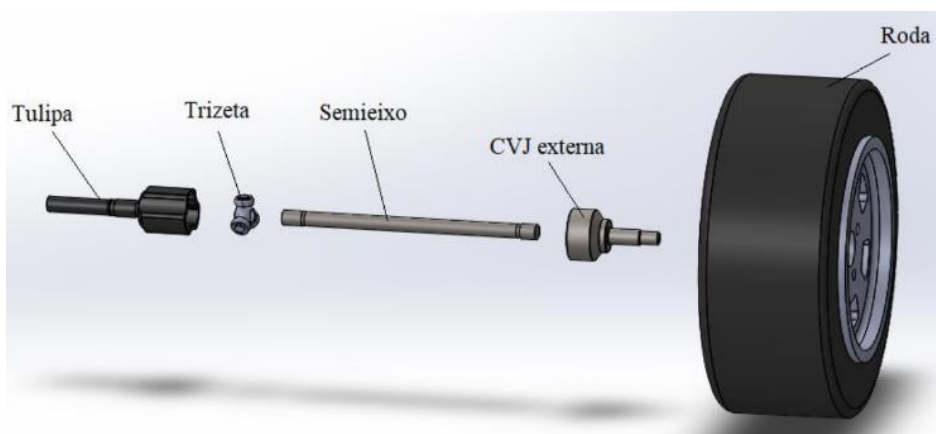
O material para estudo é a trizeta do veículo Chevrolet Spin, Figura 6, utilizada no composto da homocinética do protótipo CB11, da equipe de competição *off-road*, Cefast Baja SAE. Para o melhor entendimento desse estudo deve-se considerar a localização deste componente, como também as peças que o compõem. De acordo com as Figuras 7 e 8 visualiza-se que ela se localiza dentro da tulipa, com as estrias internas acoplada ao semi-eixo, do lado do motor.

Figura 6 – Componente de estudo: trizeta



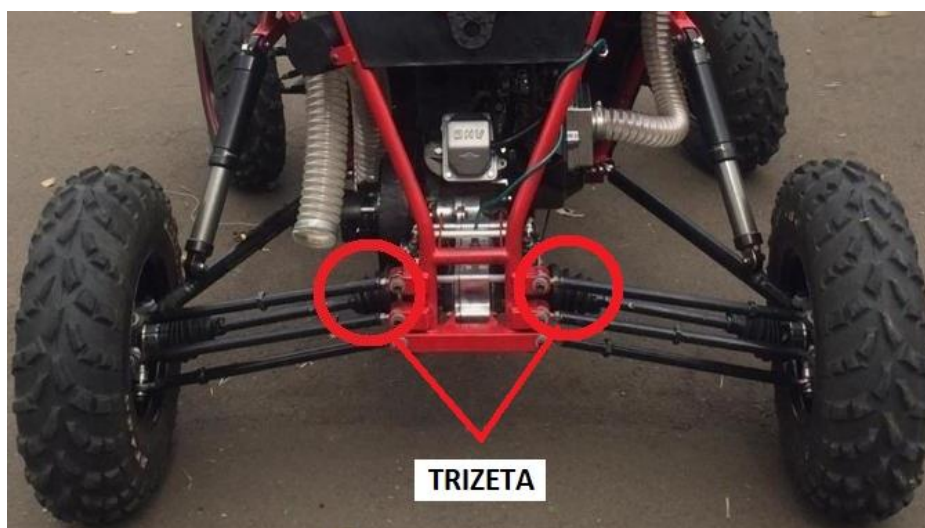
Fonte: Rodobens (2023)

Figura 7 – Vista explodida da transmissão



Fonte: Luiz (2019)

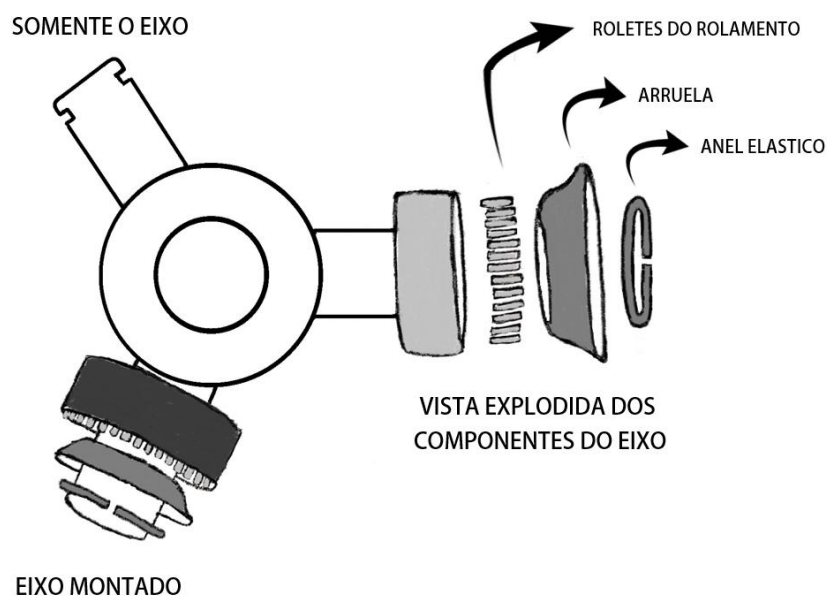
Figura 8 – Traseira do protótipo CB11



Fonte: adaptado de Cefast Baja SAE (2023)

Este componente teve um dos eixos rompido depois de um teste da equipe, realizado na pista de testes da CNH Industrial. Com esse rompimento, os rolamentos e a arruela do eixo referido foram perdidos na pista, restando apenas o anel elástico. Na Figura 9 é apresentado um croqui com a descrição das peças que compõem a trizeta. Já a pista em questão foi montada com o intuito de testar a viabilidade e resistência do protótipo *off-road*. Na Figura 10 é apresentado um percurso da pista composto de valas em sequência.

Figura 9 – Croqui do componente de estudo: trizeta



Fonte: Próprio autor

Figura 10 – Exemplo de uma pista de testes em que o protótipo é testado



Fonte: CNH Industrial (2018)

4.2 Caracterização da trizeta

Para a realização das análises práticas, tais como avaliação da superfície fractográfica, caracterização microestrutural e caracterização mecânica, foram utilizados os laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) situado no CEFET-MG Campus Nova Suíça.

4.2.1 Análise fractográfica

Para a análise fractográfica foi avaliada a situação da trizeta em duas etapas. A primeira consistiu na avaliação do componente montado, sem auxílio de equipamentos, observando-se a deformação da superfície, regiões de desgaste e marcas de contato. Para essa etapa, foram feitas análises visuais e retiradas fotografias, antes e depois da realização de uma limpeza para remoção da sujeira, graxa e outros contaminantes. Já a segunda etapa contou com a identificação dos principais pontos de desgaste do componente, separando-os em 7 peças para objeto de investigação, as quais foram limpas, analisadas visualmente e com auxílio do microscópio eletrônica de varredura (MEV), marca SHIMADZU modelo SS-550 empregando elétrons secundários. Na Tabela 1 são apresentadas as identificações das 7 peças que serão estudadas nesse trabalho.

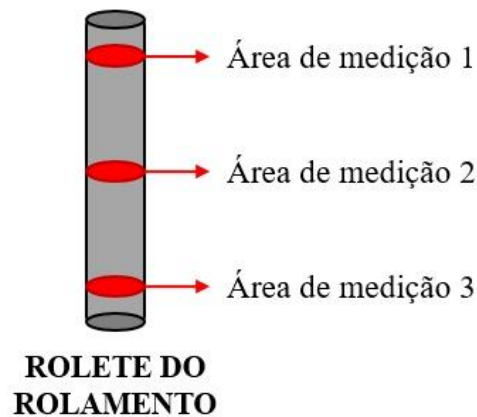
Tabela 1 – Identificação das 6 peças de maior fragilidade do componente trizeta

Número da peça	Descrição da peça
Peça 1.1	Anel elástico da parte rompida
Peça 2.1	Arruela com maior grau de deformação
Peça 2.2	Anel elástico da arruela mais deformada
Peça 2.3	Roletes do rolamento da arruela mais deformada
Peça 3.1	Arruela com menor grau de deformação
Peça 3.2	Anel elástico da arruela menos deformada
Peça 3.3	Roletes do rolamento da arruela menos deformada

Fonte: Próprio autor

Para o caso específico dos roletes do rolamento, a análise visual não seria precisa. Portanto, foi realizada a medição com o auxílio do micrômetro analógico *Starrett*, com resolução de 0,01mm, em 3 pontos distintos, sendo os pontos externos e o ponto central (Figura 11), para cada amostra, já a amostragem de cada peça foi definida em 3. Ou seja, para a peça 2.3 (Tabela 1) que se refere aos roletes do rolamento do conjunto com a arruela mais deformada, foram feitas 3 medições pelo comprimento, sendo repetido esse processo para 3 roletes distintos.

Figura 11 – Representação das áreas de medição de cada rolamento



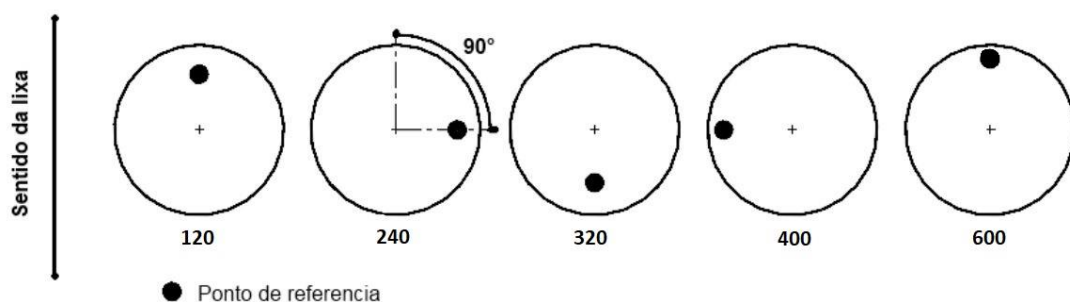
Fonte: Próprio autor

4.2.2 *Análise da microestrutura*

Essa análise consistiu no preparo e avaliação das estruturas das peças 3.1, 3.2 e 3.3, que foram suficientes para inferir sobre a microestrutura presente nos ditos pontos de fragilidade. Para isso, as amostras foram embutidas com acrílico autopolimerizável, em seguida, foram lixadas por uma série de lixas com granulometrias progressivas para realizar o refinamento da amostra. Na Figura 12 é mostrada a relação da posição da amostra e as granulometrias utilizadas durante o lixamento. Já o polimento utilizou panos de tecido e pasta de diamante de 9 e 3 μ m para se obter uma superfície lisa. Por fim, foi aplicado por imersão o reagente Nital 3% para revelar as estruturas presentes na amostra.

Em seguida, as amostras foram analisadas com o auxílio do Microscópio Ótico FORTEL com sistema de digitalização Kontrol e, posteriormente utilizando o equipamento MEV, Superscan SHIMADZU modelo SS-550, para gerar imagens das fases e os constituintes presentes.

Figura 12 – Posição da amostra durante o procedimento de lixamento



Fonte: adaptado de Vernilli (2018)

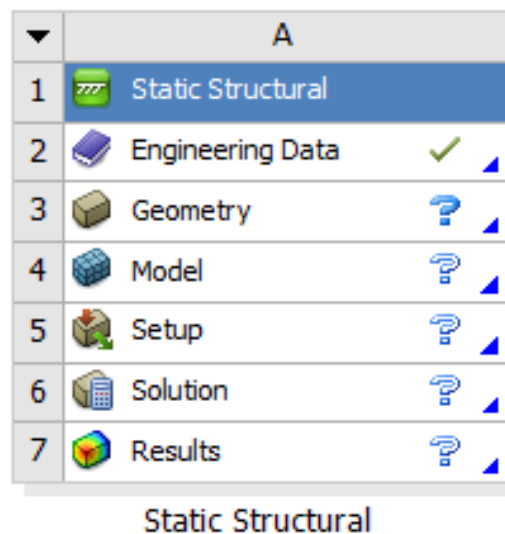
4.2.3 Ensaio de microdureza

O ensaio de microdureza, analogamente à análise microestrutural, também foi realizado nas peças 3.1, 3.2 e 3.3 que já tinham sido preparadas. O método de ensaio utilizado foi o de Dureza Vickers com o penetrador piramidal, do Microdurômetro SHIMADZU modelo HMV-2T. Para o ensaio foi usado uma carga de 500g, o tempo de penetração de 15s e foram realizadas 6 medições para cada uma das peças.

4.3 Simulação numérica

Para a simulação numérica foram realizadas 3 análises, uma para cada peça de maior fragilidade: anel elástico, arruela e rolamento. Estas análises foram realizadas com o uso do *software Ansys 2023 R1*, seguindo a metodologia padrão proposta para a análise estrutural estática. A subdivisão das etapas que compõem a análise está apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Etapas da análise estrutural estática pelo *software Ansys*

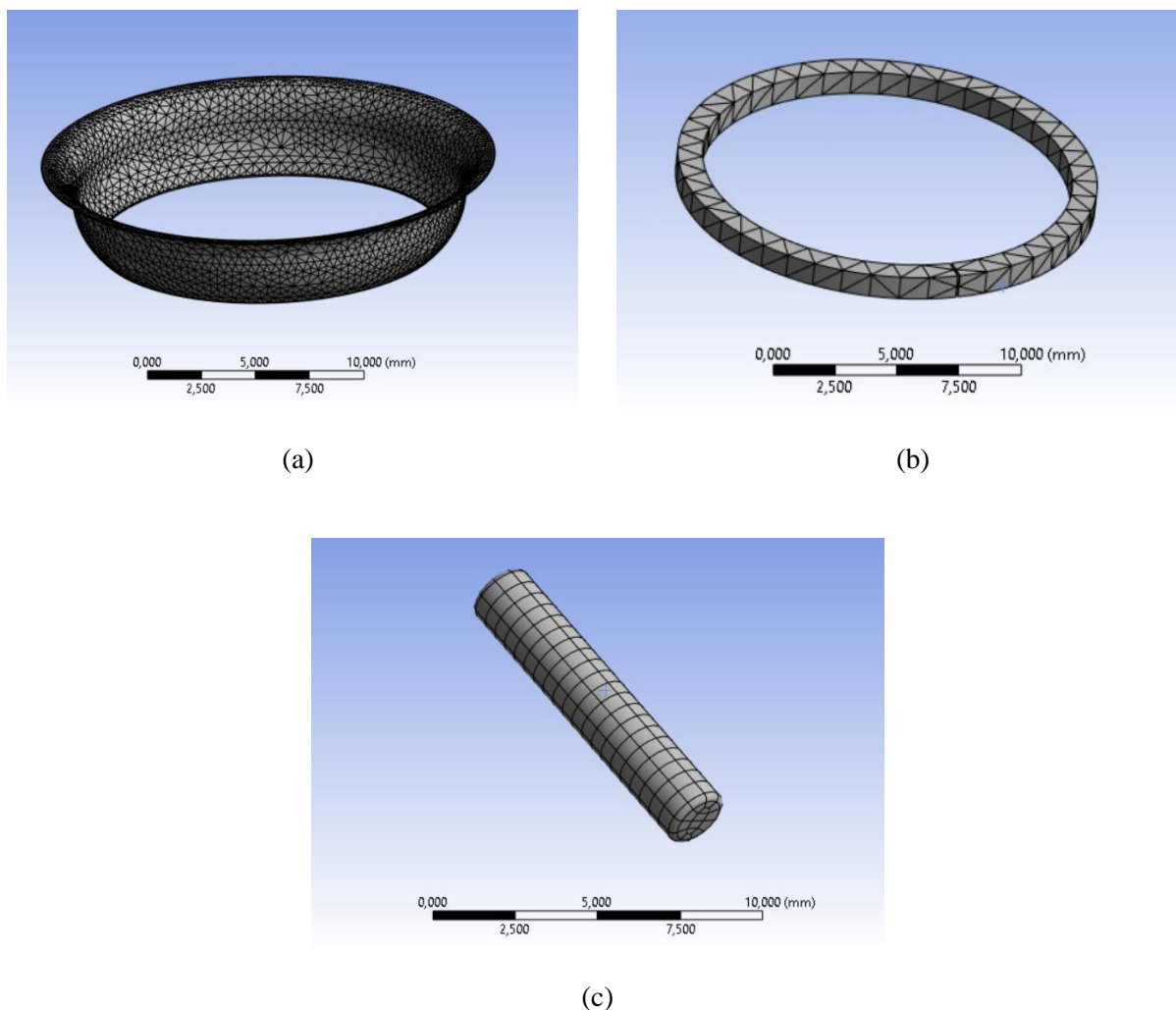


Fonte: *Ansys 2023 R1*

A etapa *Engineering Data* consistiu na definição do material, como o objetivo das análises é avaliar qualitativamente os possíveis esforços sofridos, foi definido o aço estrutural padrão do software para ambas as análises, de maneira a simplificar e padronizar as análises. Já a *Geometry* correspondeu na modelagem 3D da peça a ser analisada, as quais foram realizadas utilizando a própria extensão CAD do software – *Ansys DISCOVERY*.

Na etapa *Model* ocorreu a geração da malha que foi construída automaticamente pelo próprio software de acordo com a complexidade de cada peça. Na Figura 14 (a), (b) e (c) é mostrada a ilustração da malha gerada nas diferentes peças, enquanto na Tabela 2 são apresentados os dados referentes a constituição da malha para cada análise.

Figura 14 –Malha gerada pelo *software Ansys* para cada uma das peças



(a) Arruela. (b) Anel elástico. (c) Rolete do rolamento.

Fonte: Próprio autor

Tabela 2 – Informações sobre a malha gerada para cada peça

Parâmetros	Arruela	Anel elástico	Rolamento
Nº de nós	35604	859	1659
Nº de elementos	17248	302	308

Fonte: Próprio autor

No item 5, *Setup*, são definidas as condições de contorno para a realização da simulação, como forças e suportes fixados, baseadas nos esforços que a peça estava submetida. Para o presente estudo, o objetivo da análise foi de caráter qualitativo, visto que os esforços que causaram a falha da trizeta são distribuídos aleatoriamente, sem um padrão específico. Além disso, não foi possível determinar a magnitude desses esforços. Assim, foram adotados valores padrões de referência para simular uma deformação que se aproxime à deformação real e conseguir analisar e inferir qualitativamente sobre o caráter e as direções das possíveis forças atuantes. Na Tabela 3 são apresentados os esforços aplicados para cada simulação.

Tabela 3 – Esforços aplicadas por cada peça analisada

Parâmetros	Arruela	Anel elástico	Rolamento
Força	-1000N em x	-500N em x	-1000N em y
Tipo de suporte	Suporte fixado		

Fonte: Próprio autor

Na etapa *Solution* o software analisou as informações constantes nos itens anteriores e solucionou as equações matemáticas baseadas na resposta de deformação total e tensão equivalente (Von-Misses). Por fim, no item 7, foram apresentados os resultados das análises, numérica e graficamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados foi dividida em duas partes, separando-se as análises práticas que constituem a caracterização da trizeta e a análise numérica que compreende a simulação feita no software *Ansys*.

5.1 Caracterização da trizeta

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para as análises e ensaios práticos realizados, separando-se por tópico.

5.1.1 Análise Fractográfica

A análise fractográfica inicial consistiu em analisar a peça da forma em que ela foi encontrada para conseguir avaliar as deformações nela presentes. Na Figura 15 é mostrada uma foto do eixo que estava desmontado, apenas com o anel elástico restante (Peça 1.1). Este apresentava pontos de deformação plástica provavelmente causados por impactos sofridos nessa região.

Figura 15 – Fotografia retirada do eixo que estava desmontado

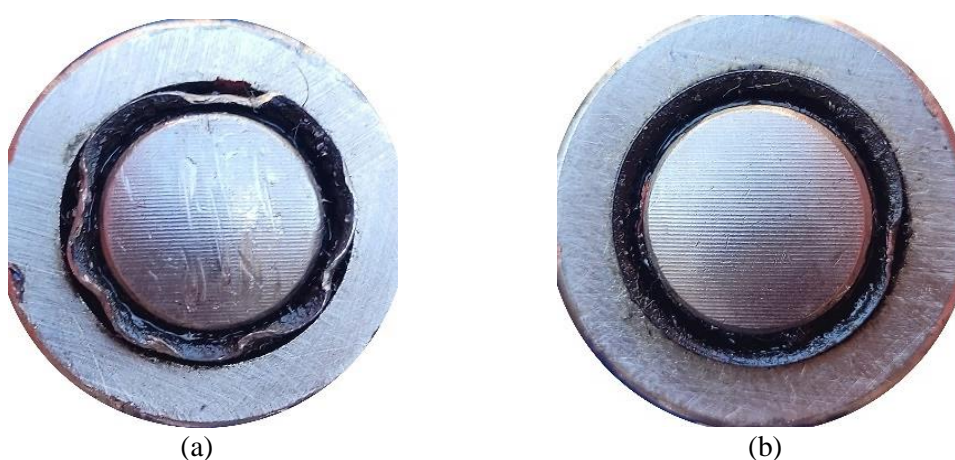


Fonte: Próprio autor

Já na Figura 16 (a) e (b) são apresentadas as fotografias retiradas dos eixos que ainda estavam montados. Neles é possível observar que ocorreu deformação plástica em ambos, contudo na Figura 16 (a), essa deformação foi bem mais acentuada, com padrão aleatório. Esse eixo é o

que origina as peças classificadas como 2.1, 2.2 e 2.3 (Tabela 1). Já o eixo da Figura 16 (b) que originou o conjunto das peças 3.1, 3.2 e 3.3 (Tabela 1) encontrou-se quase sem nenhuma deformação. Essas deformações citadas acima aparentam ser causadas por impacto na borda externa da arruela em diferentes pontos, mas sem um padrão de repetição. Outro ponto a ser levantado é a diferença notória do grau de deformação entre os eixos, o que indica que o impacto é maior em um dos lados da homocinética.

Figura 16 – Fotografia retirada dos eixos que estavam montados

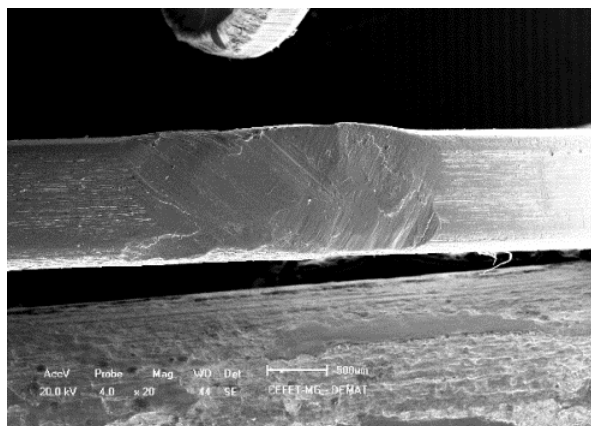


(a) Eixo mais deformado da trizeta. (b) eixo menos deformado da trizeta

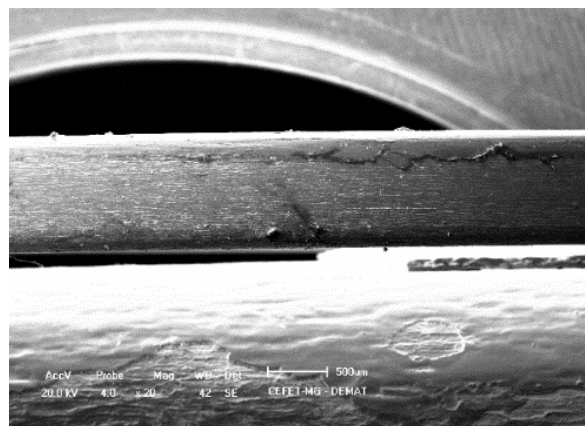
Fonte: Próprio autor

Para a segunda análise fractográfica foram obtidas imagens de MEV que possibilitaram avaliar mais detalhadamente a deformação de cada peça que compõem os eixos, Figura 17 (a), (b), (c), (d), (e) e (f). Nas Figuras 17 (a), (b) e (c) são apresentadas as imagens de MEV obtidas dos 3 anéis elásticos de cada eixo. Nessas imagens é possível visualizar a deformação plástica em diferentes níveis, sendo na Figura 17 (a) a que mais se deformou. Analisando a superfície deformada pode-se dizer que esta apresenta diferentes eixos de incidência pelo padrão organizacional da superfície, além de terem aumentado a altura dimensional da peça. Na Figura 17 (b) verifica-se o início de uma deformação que provavelmente culminaria no padrão de deformação da Figura 17 (a). Já a Figura 17 (c), observa-se o anel mais inteiro e sem graus relevantes de deformação.

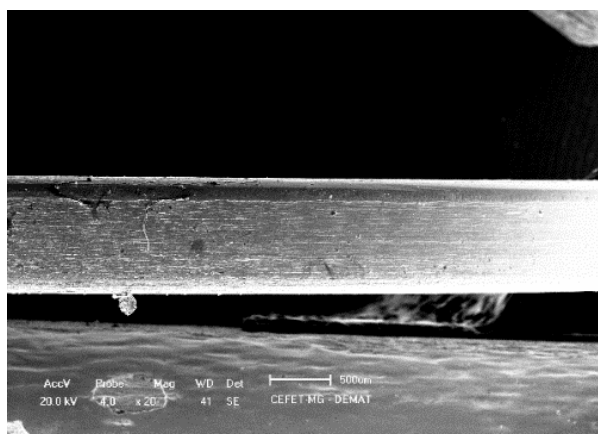
Figura 17 – Imagens obtidas no MEV por peças



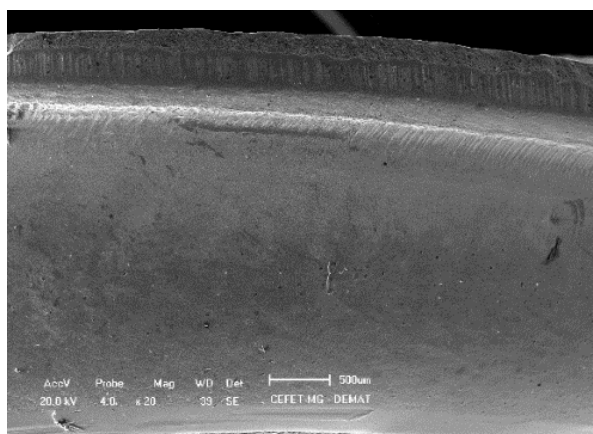
(a)



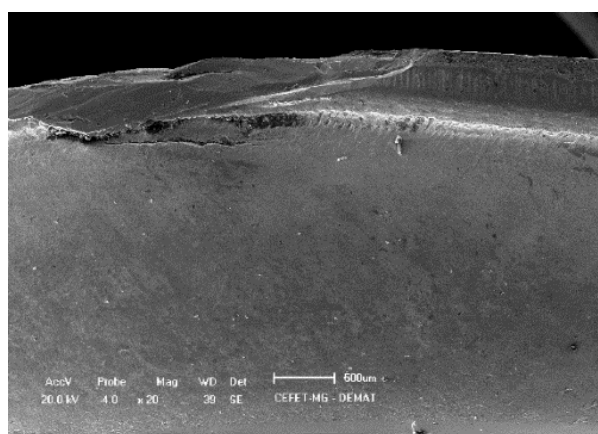
(b)



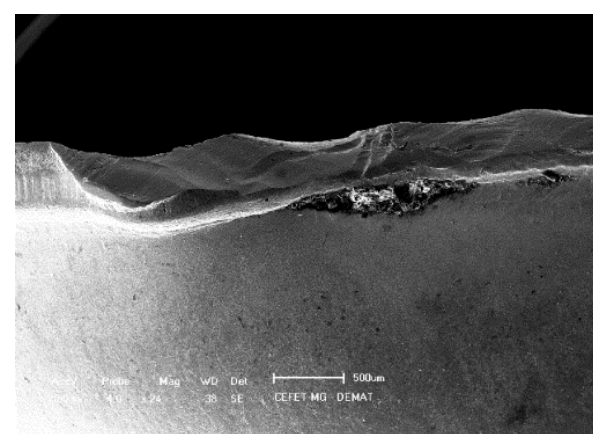
(c)



(d)



(e)



(f)

(a) Peça 1.1 (b) Peça 2.2 (c) Peça 3.2 (d) Peça 3.1 (e) Peça 2.1 (f) Peça 2.1

Fonte: Próprio autor

Nas Figuras 17 (d) e (e) são apresentados os resultados do MEV para as arruelas, as quais comparativamente poderiam ser a arruela antes de deformar e depois da deformação. Já na Figura 17 (f) é apresentada a mesma arruela da Figura 17 (e), contudo com uma ampliação um pouco maior e em um outro ponto de deformação. Essas deformações encontradas na arruela são de caráter plástico e podem ter vindo de impactos pontuais, sendo que na Figura 17 (f) esse impacto aparenta ter sido recorrente no mesmo ponto.

Para os rolamentos a avaliação foi feita em termos da variação dimensional. Como resultado foi possível observar que eles sofreram uma alteração em termos de 0,01mm, conforme apresentado na Tabela 4. Esse resultado revela que a deformação sofrida pelos rolamentos não é o que realmente impacta a falha da trizeta.

Tabela 4 – Resultado da medição dos rolamentos

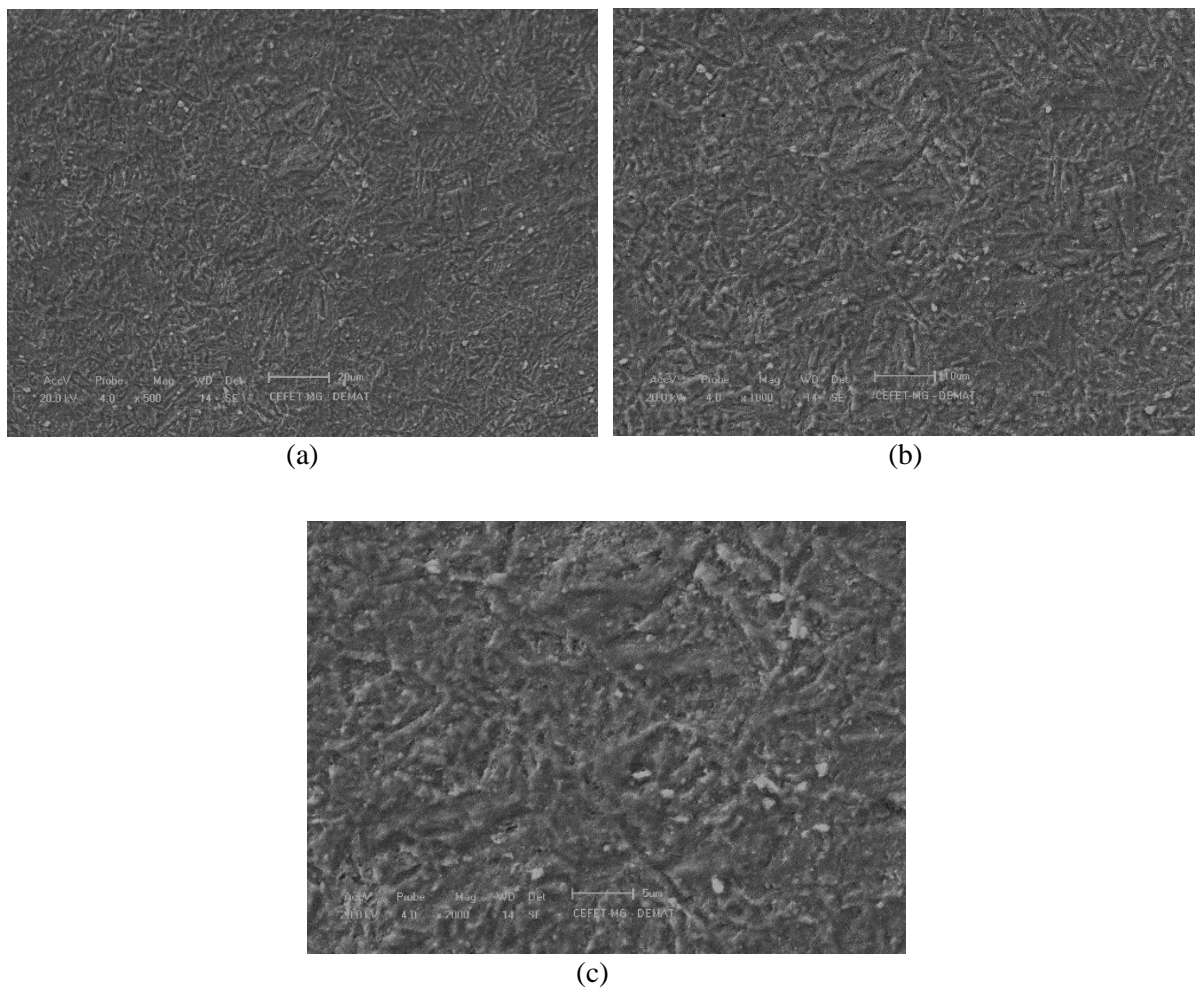
	Peça 2.3			Peça 3.3		
	<u>Amostra 1</u>	<u>Amostra 2</u>	<u>Amostra 3</u>	<u>Amostra 1</u>	<u>Amostra 2</u>	<u>Amostra 3</u>
Medição 1	1,99	1,98	1,99	1,98	1,98	1,98
Medição 2	1,99	1,98	1,98	1,97	1,97	1,98
Medição 3	1,97	1,98	1,97	1,96	1,97	1,97
Média	1,983	1,980	1,980	1,970	1,973	1,977
Desvio Padrão	0,009	0,000	0,008	0,008	0,005	0,005

Fonte: Próprio autor

5.1.2 *Análise microestrutural*

Os resultados da análise metalográfica evidenciaram as microestruturas para cada peça, medidos em 20, 10 e 5µm. Para a arruela, a microestrutura revelada na Figura 18 (a), (b) e (c) tem formato de placas longas e finas, como ripas, sugerindo a presença de martensita revenida (CHIAVERINI, 1979).

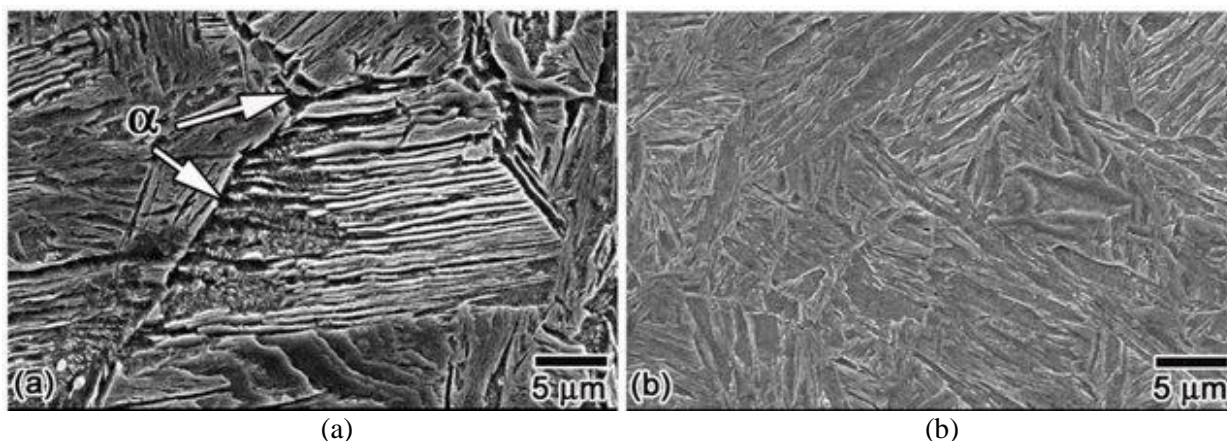
Figura 18 – Imagens obtidas no MEV da arruela

(a) Medição 20 μm . (b) Medição 10 μm . (c) Medição 5 μm

Fonte: Próprio autor

O estudo feito por Santos *et al.* (2015) apresentou micrografias semelhantes essencialmente martensíticas, mas com a presença de regiões de ferrita alotriomórfica identificadas como α . Essas imagens são apresentadas na Figura 19 (a) e (b).

Figura 19 – Imagens MEV de aços temperados



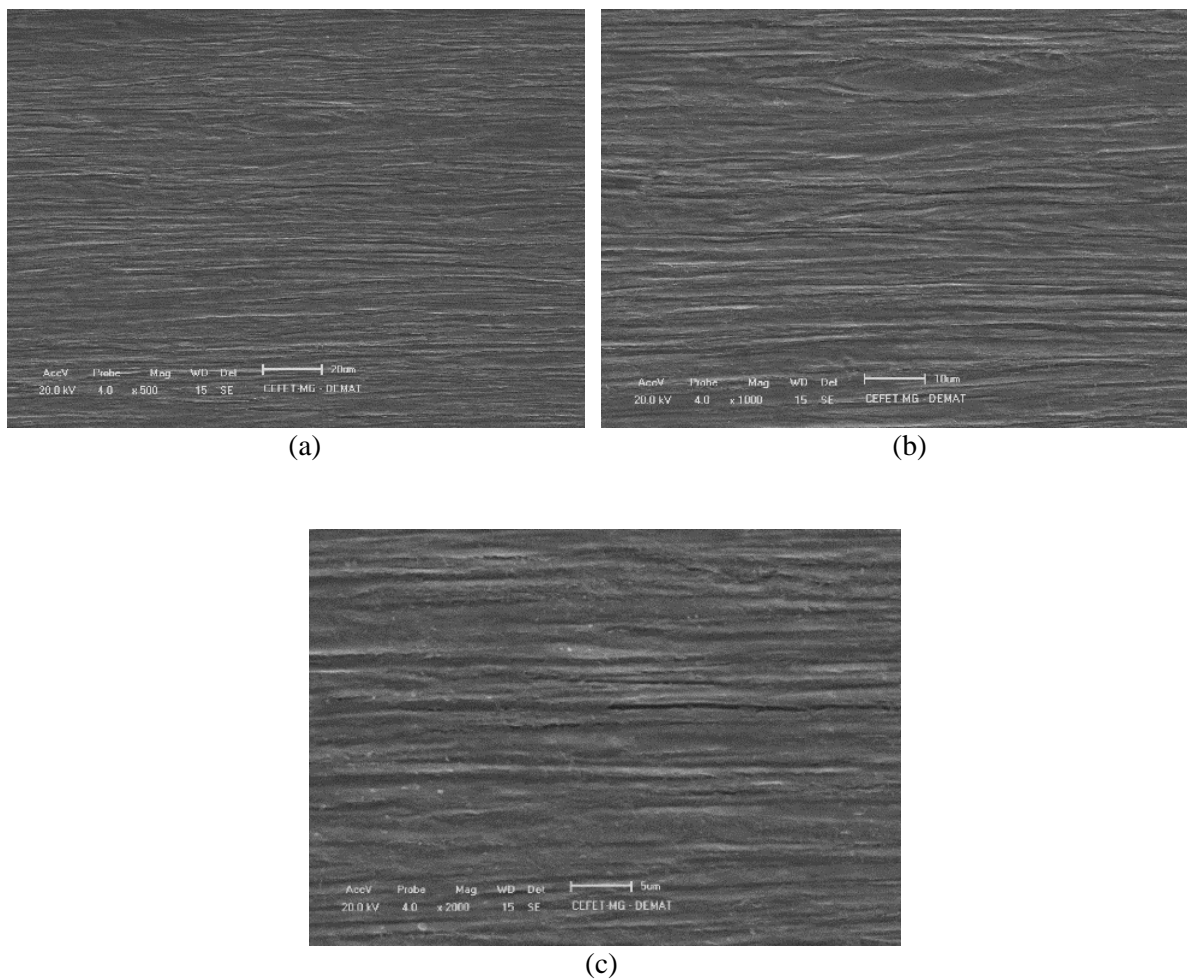
(a) Aço I-Nb temperado a 1000°C. (b) Aço I temperado a 950°C

Fonte: Santos et al. (2015)

As propriedades mecânicas da martensita revenida são a elevada dureza associada à ductilidade e tenacidade obtidas no processo de revenimento. Devido a isso, pode-se inferir que a arruela suportava deformações plásticas até seu rompimento, semelhante ao observado na prática.

As micrografias referentes ao anel elástico são apresentadas na Figura 20 (a), (b) e (c). O resultado indica que o anel elástico foi conformado a frio devido ao caráter alongado dos grãos na microestrutura. Já na Figura 21 é exibido um parafuso também conformado a frio, por forjamento, em que é evidenciado macrograficamente as linhas de escoamento. Em relação às propriedades mecânicas do processo de conformação a frio tem-se um aumento da resistência na direção da deformação, devido ao encruamento. Entretanto, esse material pode apresentar propriedades anisotrópicas – resistências diferentes, em direções diferentes. Essas propriedades podem se relacionar com a deformação majoritariamente transversal apresentada no anel elástico (SURIS, 2012).

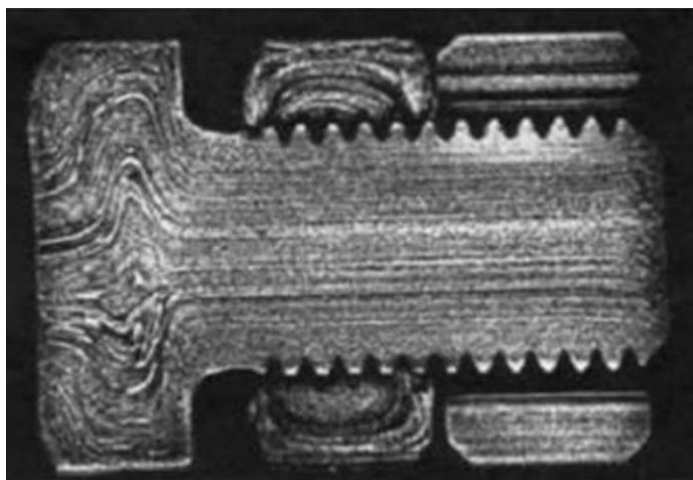
Figura 20 – Imagens obtidas no MEV do anel elástico



(a) Medição 20 µm; (b) Medição 10 µm; (c) Medição 5 µm.

Fonte: Próprio autor

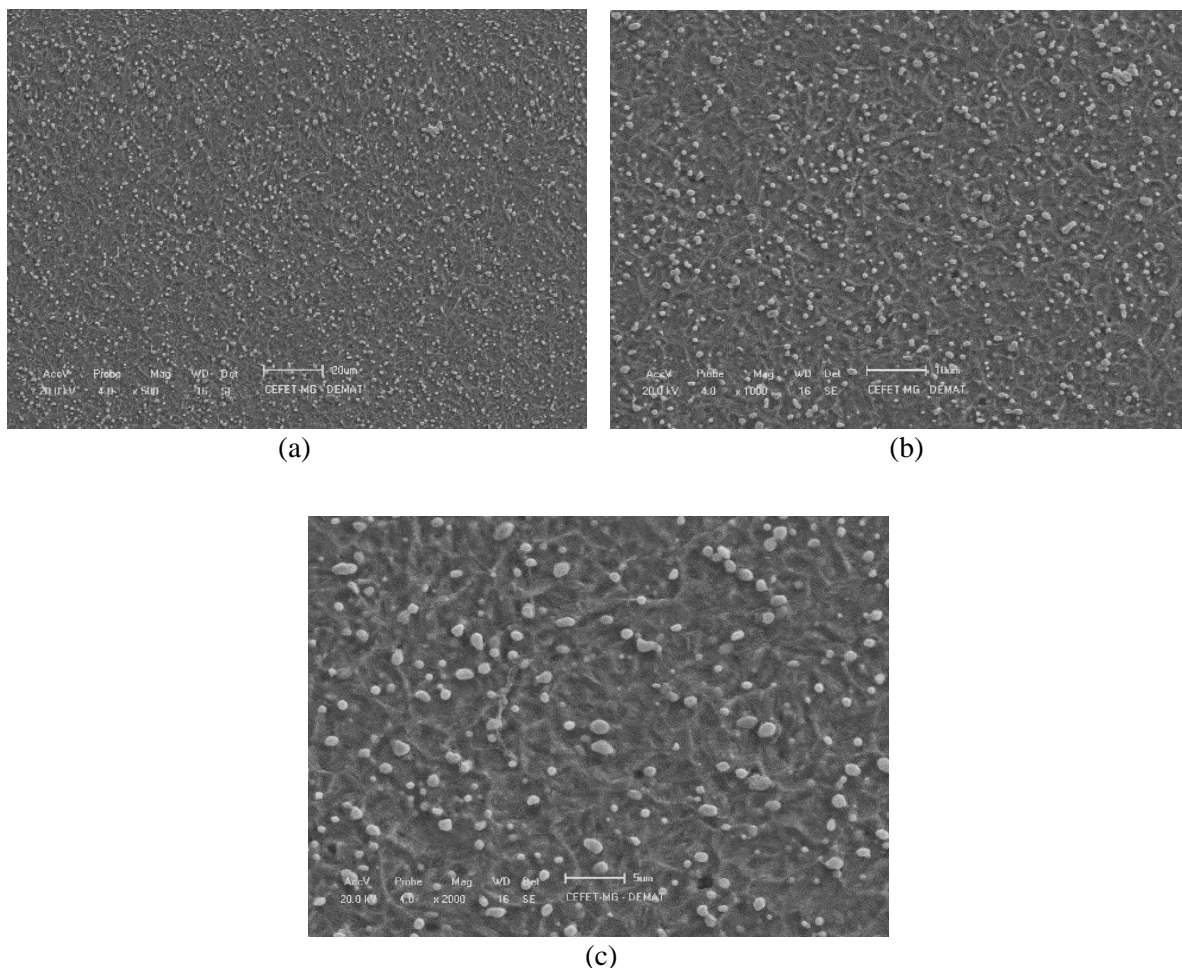
Figura 21 – Parafuso obtido em um processo de forjamento



Fonte: SURIS (2012)

Para o rolete do rolamento, as imagens obtidas por MEV revelaram a presença de martensita revenida com precipitados em formatos esféricos, como mostrado na Figura 22 (a), (b) e (c). Devido a coloração dos roletes e por eles não apresentarem níveis de oxidação perceptíveis, pode-se inferir que é um aço inoxidável martensítico. Leite *et al.* (2016) analisaram um aço inoxidável martensítico temperado em diferentes temperaturas que apresentaram microestrutura semelhante, Figura 23 (a) e (b). Segundo os autores, as precipitações esféricas são carbonetos primários advindos do processamento anterior e a presença destas leva ao maior endurecimento do material. Para os rolamentos essa elevada dureza explica a baixa alteração dimensional que provavelmente sofreu esforços de compressão na direção transversal.

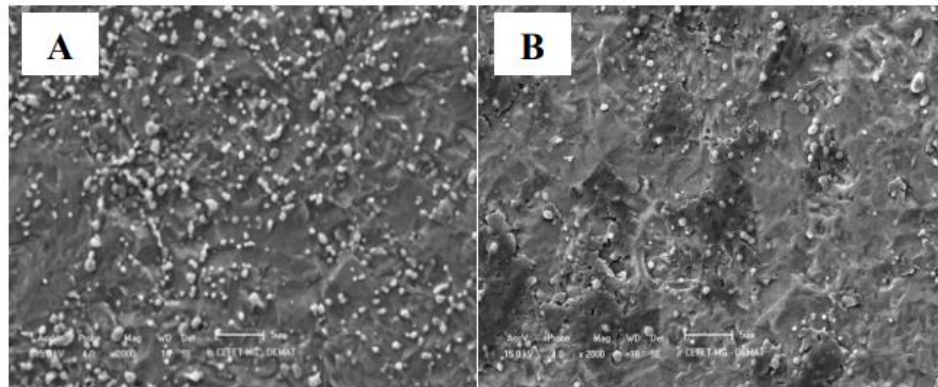
Figura 22 – Imagens obtidas no MEV do rolete do rolamento



(a) Medição 20 μm . (b) Medição 10 μm . (c) Medição 5 μm

Fonte: Próprio autor

Figura 23 – Micrografias MEV de um aço inoxidável martensítico temperado



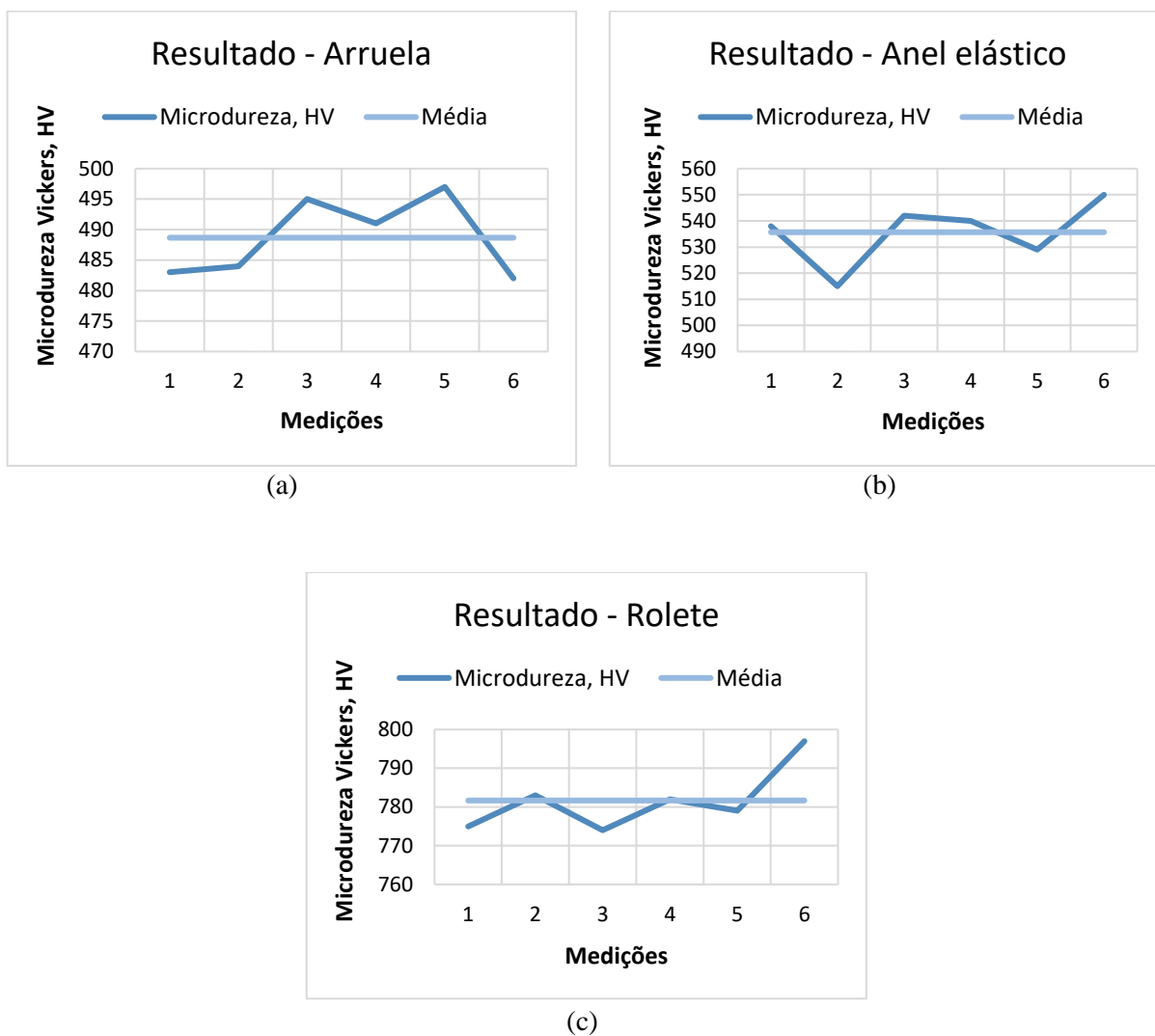
(a) Temperado a 850°C. (b) Temperado a 950°C

Fonte: Leite et al. (2016)

5.1.3 Ensaio de microdureza

Os resultados do ensaio apresentados na Figura 24 (a), (b) e (c) mostram a variação dos valores de microdurezas medidos ao longo de cada peça avaliada. Já na Tabela 5 são exibidos os valores médios por amostra, os quais corroboram as discussões do tópico anterior. A arruela apresentou o menor valor de microdureza, sendo 489 ± 6 HV, indicando um material duro, como é o caso da martensita revenida. Já o resultado do anel elástico encontrado de 536 ± 11 HV se relaciona com a propriedade de alta dureza advinda dos processos de conformação mecânica associados ao encruamento. Por fim, o rolete do rolamento foi o material mais duro, com 782 ± 8 HV, corroborando a teoria de ser um aço inoxidável martensítico, devido ao endurecimento pela presença de martensita e por precipitação sólida dos carbonetos (CHIAVERINI, 1979; LEITE *et al.*, 2016; SURIS, 2012).

Figura 24 – Variações dos valores encontrados no ensaio de microdureza por amostra



(a) Resultados obtidos para arruela. (b) anel elástico. (c) rolete do rolamento

Fonte: Próprio autor

Tabela 5 – Valores médios do ensaio de microdureza por peça

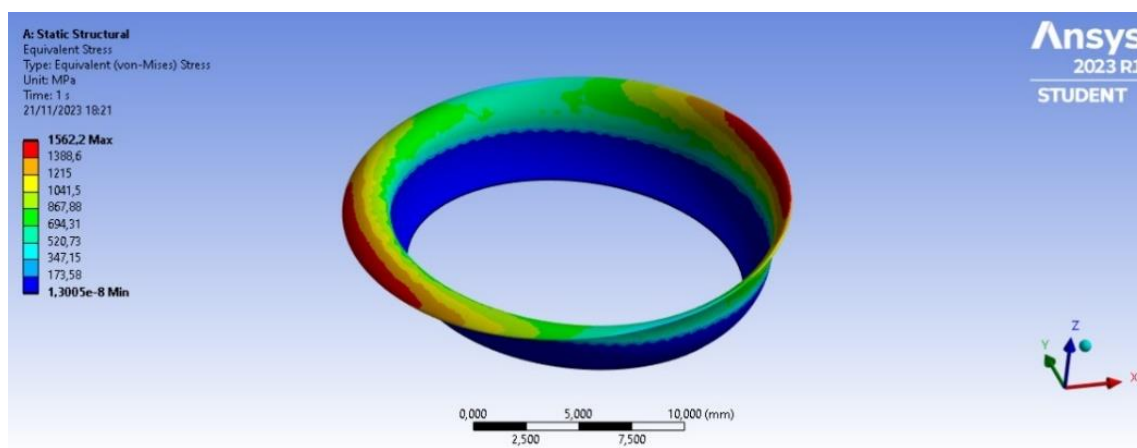
	Valores de Microdureza Vickers, HV		
Peças	Arruela	Anel elástico	Rolamento
Média	489 ± 6	536 ± 11	782 ± 8

Fonte: Próprio autor

5.2 Simulação numérica

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas de acordo com as condições de contorno expostas em material e métodos. O objetivo dessas análises é compreender qualitativamente possíveis esforços sofridos nas peças e o sentido das forças que causam as deformações. Para a arruela, devido à limitação do software, foi aplicado uma força em toda a face da aba da peça, a qual foi deformada para cima, Figura 25. Esse comportamento obtido revelou que na aplicação real, a arruela deve sofrer forças pontuais nessa aba, na direção x, por apresentar várias deformações espaçadas aleatoriamente para cima.

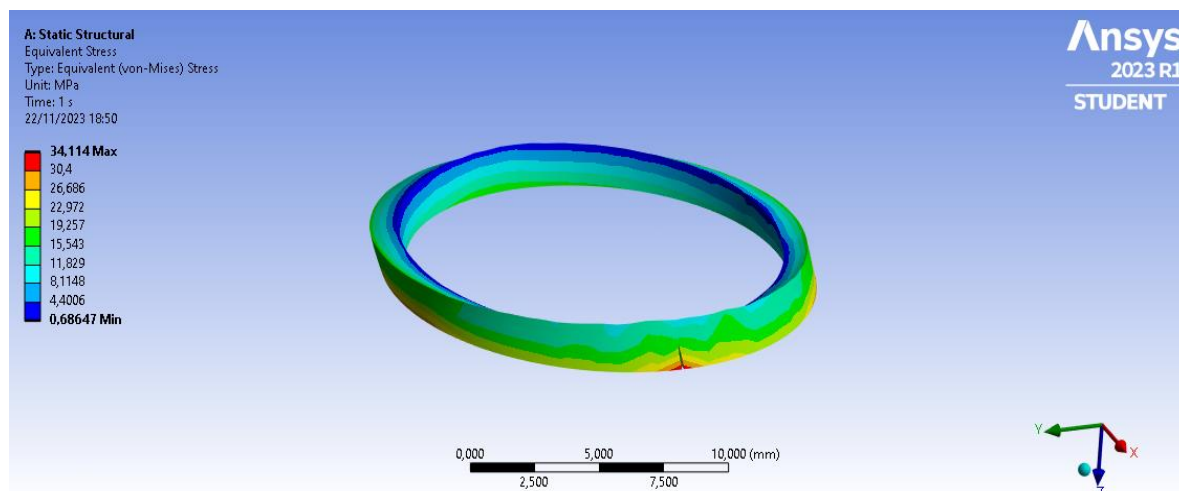
Figura 25 – Resultado da simulação numérica obtido para a arruela



Fonte: Próprio autor

A simulação no anel elástico foi realizada com a força aplicada na face externa no plano yz, na direção x. Como resultado obteve-se a alteração dimensional provocada pela deformação na extensão da face, Figura 26. A deformação ocorrida fez com que o material fosse empurrado do centro para as extremidades, aumentando a altura e reduzindo a espessura deste. Comparando com o encontrado nas arruelas na prática, pode-se inferir que o sentido de aplicação da força ocorre em x. Além disso, no local em que essa força é aplicada, a deformação tende a apresentar esse padrão, porém com uma geometria mais irregular que devem ser advindas de esforços sofridos com angulações diferentes no plano yz.

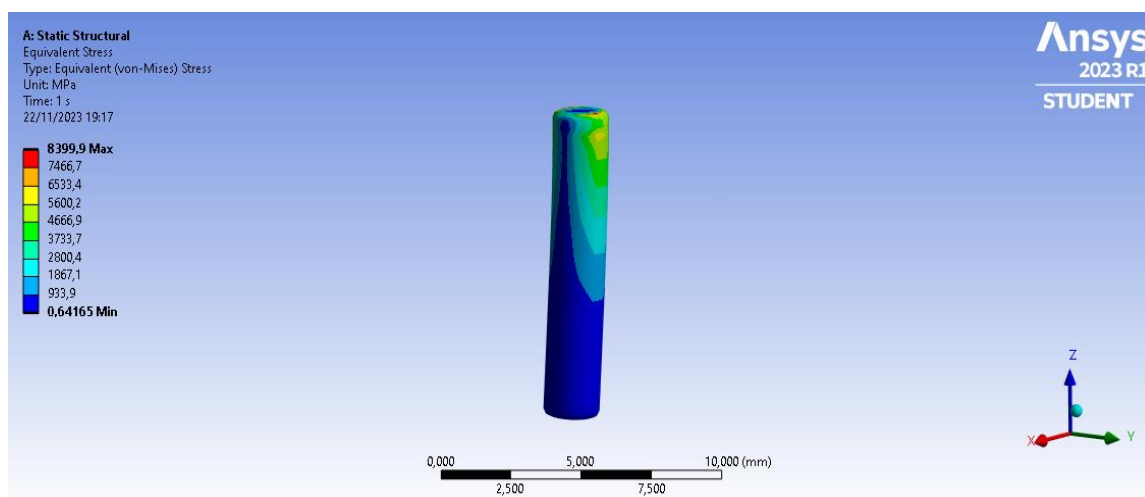
Figura 26 – Resultado da simulação numérica obtido para o anel elástico



Fonte: Próprio autor

Por fim, para a simulação do rolete do rolamento, de maneira análoga às demais também foi aplicada uma força na face externa do rolete, porém no plano xz. O resultado apresentou um empenamento da peça, além de deformações que alteraram as dimensões do rolete do rolamento, aumentando a altura e reduzindo o diâmetro deste, Figura 27. Na prática, os rolamentos também apresentaram esse tipo de alteração dimensional, indicando que a deformação ocorre no plano xz. Além disso, o empenamento também foi identificado, porém em menor grau. Isso pode ser explicado pela existência da parte externa que aloja os rolamentos, protegendo-os de uma deformação mais brusca.

Figura 27 – Resultado da simulação numérica obtido para o rolete do rolamento



Fonte: Próprio autor

6. CONCLUSÃO

Após analisar os resultados foi possível concluir que dentre as peças de maior fragilidade do equipamento: arruela, anel elástico e rolete do rolamento, a primeira é a mais determinante para a falha do componente. Isso porque a alteração dimensional dos roletes foi quase imperceptível e o anel elástico contou com deformações plásticas, mas no caso mais extremo – no eixo que foi encontrado desmontado – ele ainda apresentava condições mínimas de uso. Por outro lado, a arruela foi a que apresentou deformações mais relevantes, além dela possuir a importante função de barreira física, evitando que o eixo seja desmontado e ocorra a falha da trizeta.

As deformações apresentadas na arruela, em especial na peça 2.1, foram bruscas e de caráter aleatório, sugerindo que o impacto sofrido é bastante alto. Já a microestrutura constituída de martensita é uma opção adequada para os esforços que esta sofre, por unir alta dureza e propriedades de tenacidade e ductilidade. Além disso, deve-se considerar que o componente usado é projetado para uso em veículos de passeio, os quais sofrem bem menos esforços durante o uso. Dessa forma, a alternativa para prevenir a falha prematura desse componente seria escolher trizetas mais robustas projetadas para veículos *off-road*, que apresentem arruelas com maiores espessuras de borda. Isso asseguraria uma maior resistência para essa peça essencial no desempenho do componente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLISON, P. D. Multiple Regression: A Primer. **Thousand Oaks:** SAGE Publications, 1999.

ANTONY, J.; KUMAR, M. Design of Experiments for Engineers and Scientists. **New Delhi:** New Age International, 2003.

ASTM E10-18e1, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

ASTM E1417-16, Standard Practice for Liquid Penetrant Testing. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.

ASTM E165-20, Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination for General Industry. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

ASTM E466-15, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.

ASTM E561-17, Standard Practice for Microscopic Examination and Analysis of Refined Lead and Fire-Refined Copper. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

ASTM E747-18, Standard Practice for Design, Manufacture, and Material Grouping Classification of Wire Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

BAZU, M. **Failure Analysis: A Practical Guide for Manufacturers of Electronic Components and Systems.** Springer Science & Business Media, 2011.

BEN-DAYA, M.; AL-ABDULLAH, H.; AL-AHMARI, A. **Maintenance Engineering Handbook.** 2nd ed. London: Springer, 2020.

CALLISTER JR, W. D., RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction.** John Wiley & Sons, 2018.

CALLISTER JR., W.D., RETHWISCH, D.G. **Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach.** New York: John Wiley & Sons, 2012.

CHEN, L., GAO, X., ZHOU, Z. A multi-attribute decision-making method for FMEA based on hesitant fuzzy sets. **Applied Soft Computing**, 2021.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 4.ed., 1979.

DAVIS, J.R. ASM. **Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys**. Materials Park, OH: ASM International, 1993.

DAVIS, J. H. **Statistics for Six Sigma Green Belts with Minitab and JMP**. Boca Raton: CRC Press, 2020.

DIETER, G. E., BACON, D. J. **Mechanical Metallurgy**. McGraw-Hill Education, 2018.

DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy**. New York: McGraw-Hill, 1988.

GUO, S., YUAN, Z. **An improved FMEA method based on intuitionistic fuzzy linguistic information**, 2020.

HARRIS, D. C. **Análise Química Quantitativa**. LTC Editora, 2010.

HOLTZMAN, J. R. **Strategic Customer Service: Managing the Customer Experience to Increase Positive Word of Mouth, Build Loyalty, and Maximize Profits**. New York: American Management Association, 2015.

JURAN, J. M. *et al.* (2018). **Juran's Quality Handbook: The Complete Guide to Performance Excellence**. McGraw-Hill Education.

KIRITSIS, D., HADJIDEMA, S. Failure mode and effect analysis (FMEA): A bibliometric review. **Reliability Engineering & System Safety**, 167, 104-119, 2017.

KOTAS, T.J. **Analyzing and Solving Field Failures: A Guide for Analyzing Product Failures**. Prentice Hall, 1995.

LEIJUN, L., JIANQIAO, Y. **Fractography of ceramics and glasses**. Springer Science & Business Media, 2008.

LEITE, P. A. C. *et al.* **Caracterização Mecânica e Microestrutural de um Aço Inoxidável Martensítico de Médio Teor de Carbono após Têmpera e Revenimento**. 71º Congresso Anual da ABM – Internacional e 16º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de

Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 26 a 30 de setembro de 2016, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LUIZ, M. S. **Desenvolvimento de uma Trizeta pelo Método de Elementos Finitos Aplicado a um Veículo do Tipo Fórmula SAE**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado no Curso de Graduação em Engenharia Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

LUYCKX, L. *et al.* **Metallography of Steels: Interpretation of Structure and the Effects of Processing**. Materials Science and Technology, vol. 22, no. 11, pp. 1347-1355, 2006.

MCDERMOTT, R. E. **FMEA - A Tool for Reducing Risk in Medical Devices**. Boca Raton: CRC Press, 2013.

MOURELLE, M., ORTEGA, M. G. **Root Cause Analysis for Industrial Incidents**. In Engineering Tools for Environmental Risk Management (pp. 1-22). Springer, 2017.

NASCIMENTO, R. A. *et al.* **Failure analysis of a half-shaft of a formula SAE racing car**. Engineering Failure Analysis, [S.l.], v. 123, p. 105331, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105331>.

PAHL, G. *et al.* **Engineering Design: A Systematic Approach**. Springer Science & Business Media, 2013.

SANTOS, T. F. A. *et al.* **Caracterização microestrutural de aços baixo carbono por microscopia de força atômica**. Rev. LatinAm. Metal. Mater. [online], vol.35, n.1, pp.118-133. ISSN 0255-6952., 2015.

SKOOG, D. A., HOLLER, F. J., CROUCH, S. R. **Princípios de Análise Instrumental**. Bookman Editora, 2017.

SMITH, J. M., SILVA, R. S., CABRAL, J. M. P. **Root Cause Analysis: The Core of Problem Solving and Corrective Action**. In Quality Management and Six Sigma (pp. 3-24). Springer, 2019.

SUBRAMANIAN, R. **Failure Analysis Techniques for Electronic Components**. Artech House, 2011.

SURIS, J. A. **Influência da fibragem na vida em fadiga de componentes obtidos pelo processo de forjamento a quente**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

TORIBIO, J., TORRALBA, J. M. **Fractography of metals and plastics**. Springer Science & Business Media, 2006.

VANDEN HEUVEL, L. N. **Root Cause Analysis Handbook: A Guide to Effective Incident Investigation**. Rothstein Publishing, 2008.

VOGEL, A. I. **Química Analítica Qualitativa**. LTC Editora, 2013.

WATSON, H. A. **A Technique for Bionuclear Reactor Incident Analysis**. Operations Research, Vol. 9, No. 3, pp. 383-398, 1961.

YOUSIF, B. F., ALRASHED, E. A. Forensic investigation of a failed connecting rod from a motorcycle engine. **Case Studies in Engineering Failure Analysis**, v. 3, p. 20-28, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csefa.2014.10.001>.

ZHANG, L., ZHOU, M. A comprehensive review of risk analysis methods: FMEA, FTA and PHA. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 70, 104370, 2021.