



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



LALINE GRAMMONT DE CRISTO

**APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE
PARA ANÁLISE DE FALHA DE SOLTURA DE RODA EM UMA
FROTA DE CAMINHÕES: O CASO DE UMA MINERADORA**

OURO PRETO - MG
2025

LALINE GRAMMONT DE CRISTO

laline.cristo@aluno.ufop.edu.br

**APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE
PARA ANÁLISE DE FALHA DE SOLTURA DE RODA EM UMA
FROTA DE CAMINHÕES: O CASO DE UMA MINERADORA**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro
Preto como requisito para a obtenção
do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: MSc Sávio Sade Tayer

**OURO PRETO – MG
2025**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C933a Cristo, Laline Grammont de.

Aplicação da manutenção centrada na confiabilidade para análise de falha de soltura de roda em uma frota de caminhões [manuscrito]: o caso de uma mineradora. / Laline Grammont de Cristo. - 2025.
90 f.: il.: color., gráf..

Orientador: Prof. Me. Sávio Sade Tayer.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Localização de falhas (Engenharia). 2. Engenharia mecânica - Parafusos. 3. Confiabilidade (Engenharia) - Avaliação de riscos - Diagrama de Ishikawa. I. Tayer, Sávio Sade. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Laline Grammont de Cristo

Aplicação da manutenção centrada na confiabilidade para análise de falha de solda de roda em uma frota de caminhões: o caso de uma mineradora

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 23 de outubro de 2025.

Membros da banca

MSc - Sávio Sade Tayer - Universidade Federal de Ouro Preto

DSc - Washington Luis Vieira da Silva - Universidade Federal de Ouro Preto

DSc - Elisângela Martins Leal - Universidade Federal de Ouro Preto

Sávio Sade Tayer, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/10/2025



Documento assinado eletronicamente por **Sávio Sade Tayer, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/10/2025, às 13:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1003780** e o código CRC **9EA853E8**.

A Deus pela proteção e aos meus pais
por não medirem esforços para a
concretização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTO

A minha mãe, fonte de amor e zelo, que me deu asas durante todo esse voo e não mediu esforços para um pouso seguro.

Ao meu pai por tirar meus pés do chão, pelos conselhos e por ser sempre minha inspiração e exemplo de vida.

A minha vó pelo acolhimento e pelas vivências.

A minhas tias e primos pelo carinho e acolhida sempre.

A Geni e a Conceição pelo cuidado.

Ao Diego pela cumplicidade e amor.

À Cléo, minha segunda mãe.

Ao meu orientador Savio pelo incentivo, orientação neste trabalho e por ser sempre solícito em me ajudar.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por todos os ensinamentos e conhecimentos compartilhados, em especial a professora Elisângela por não desistir de mim.

A CSN, por me apresentar o mundo mágico da mineração.

A Sotreq por me inserir na manutenção e me aprofundar nos conceitos de análise de falhas.

Agradeço, por fim, mas não menos importante, à Escola de Minas e à UFOP pelo ensino de excelência e pela oportunidade de me formar na mesma escola que meu avô.

A educação é realmente transformadora e a escolha de uma profissão jamais deveria ser um privilégio, por isso agradeço a todos que sustentam a ideia de um ensino universal, gratuito e de qualidade.

“A força de vontade deve ser mais forte que a habilidade.

Muhammad Ali

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo aplicar as técnicas da MCC para análise de falha de soltura de rodas de uma frota de caminhões de uma mineradora, por se tratar de uma falha recorrente que estava impactando a disponibilidade dos caminhões e a segurança dos colaboradores. Para isso este estudo teve como base teórica a MCC – Manutenção centrada na confiabilidade, as metodologias de tratamento de falhas, fratura e fadiga de materiais. A metodologia aplicada foi o estudo de caso com abordagem exploratória, onde foi realizada uma análise do processo de manutenção e dos modos e efeitos da falha utilizando as técnicas da MCC para investigação das causas, como o Método dos Porquês e o Diagrama de Ishikawa. Uma das possíveis causas apresentadas foi de que os parafusos utilizados para fixar as rodas teriam um problema de fabricação, por isso vinham a fraturar, para isso foram realizadas análises macroscópicas e microscópicas dos parafusos fraturados e de um novo. O estudo concluiu que as causas que levaram a fratura dos parafusos e a soltura das rodas foi a associação dos problemas evidenciados nos parafusos novos (trincas, descarbonetação, regiões com descontinuidades e regiões com ausência da camada superficial) junto com o excesso de torque utilizado pela equipe, que, com o uso da pneumática nova, que possuía um torque muito superior que a ferramenta anteriormente utilizada, sobrecarregou os parafusos, gerando picos de tensão e marcas de catraca que posteriormente geraram uma fratura por fadiga e a soltura das rodas. Por fim, foi possível levantar recomendações de ações capazes de eliminar ou minimizar a causa raiz, como a troca dos parafusos, a troca de ferramenta e a melhor instrução da equipe de manutenção.

Palavras-chave: Análise de falha. Método dos porquês, diagrama de Ishikawa. Causa. Parafuso. Fratura.

ABSTRACT

This study aims to apply RCM techniques to analyze wheel-loose failures in a mining company's truck fleet, a recurring issue that has been impacting truck availability and employee safety. This study was based on RCM (Reliability-Centered Maintenance) as a theoretical framework, including methodologies for treating failures, fractures, and material fatigue. The methodology applied was a case study with an exploratory approach, analyzing the maintenance process and the failure modes and effects using RCM techniques to investigate causes, such as the Why Method and the Ishikawa Diagram. The methodology used was an exploratory case study, analyzing the maintenance process and the failure modes and effects using CCM techniques to investigate causes, such as the Why Method and the Ishikawa Diagram. One possible cause suggested that the bolts used to secure the wheels had a manufacturing defect, resulting in a fracture. Macroscopic and microscopic analyses of the fractured bolts and a new one were performed. The study concluded that the causes of bolt fracture and wheel loosening were a combination of the problems observed in the new bolts (cracks, decarburization, discontinuous areas, and areas with a missing surface layer), combined with the excessive torque applied by the team. Using the new pneumatic tool, which had much higher torque than the previously used tool, the team overloaded the bolts, generating stress spikes and ratchet marks that subsequently led to fatigue fracture and wheel loosening. Finally, recommendations for actions capable of eliminating or minimizing the root cause were made, such as replacing the bolts, changing the tool, and improving the maintenance team's training.

Keywords: Failure analysis. Why method. Ishikawa diagram. Cause. Screw. Fracture

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da Manutenção	7
Figura 2: Escala de impacto da falha.....	8
Figura 3: Taxa de falhas e o ciclo de vida	9
Figura 4: Ideias relacionadas ao conceito de Confiabilidade	10
Figura 5: Fluxograma Causa Raíz	12
Figura 6: Processo de RCFA	13
Figura 7: Exemplo de Diagrama de Ishikawa	14
Figura 8: Tipos de fratura	16
Figura 9: Fratura por fadiga.....	18
Figura 10: Materiais e Métodos.....	24
Figura 11: Modelos de roda do equipamento	28
Figura 12: Parafuso fraturado na roda que soltou	29
Figura 13: Parafuso de roda fraturado	29
Figura 14: Parafusos coletados	30
Figura 15: Consumo de parafusos de roda (out/23 a mai/24).....	31
Figura 16: Quantitativo de ordens de manutenção na área de borracharia.....	32
Figura 17: Comparativo de quantitativo de ordens de manutenção na área de borracharia (2022 - 2024)	33
Figura 18: Diagrama de Ishikawa: Soltura de roda	35
Figura 19: Diagrama dos Porquês – Estoque.....	36
Figura 20: Diagrama dos Porquês – Procedimento	37
Figura 21: Diagrama dos Porquês – Pneumática.....	38
Figura 22: Pneumática antiga e nova.....	39
Figura 23: Comparativo de torques das pneumáticas	39
Figura 24: Diagrama dos Porquês - Parafuso novo	40

Figura 25: Locais de retirada de amostras para análises	41
Figura 26: Superfície da fratura – parafuso fraturado 1	42
Figura 27: Superfície lateral – parafuso fraturado 1	43
Figura 28: Superfície da fratura – Parafuso fraturado 2	43
Figura 29: Superfície lateral da fratura – Parafuso fraturado 2	44
Figura 30: Superfície lateral - Parafuso empenado 3	44
Figura 31: Superfície lateral - Parafuso novo 4	45
Figura 32: Superfície da fratura - parafuso fraturado 1	45
Figura 33: Superfície da fratura com aspecto de corrosão – parafuso fraturado 1	46
Figura 34: Superfície da fratura – parafuso fraturado 1 - 37X	46
Figura 35: Superfície da fratura – parafuso fraturado 1	47
Figura 36: Superfície da fratura – parafuso fraturado 1 – 1899X	48
Figura 37: Superfície da fratura– parafuso fraturado 1	49
Figura 38: Meio da fratura - parafuso fraturado 1	49
Figura 39: Superfície lateral da fratura (região dos filetes) – parafuso fraturado 1	50
Figura 40: Superfície da fratura – parafuso fraturado 2	50
Figura 41: Superfície da fratura – parafuso fraturado 2	51
Figura 42: Superfície da fratura – parafuso fraturado 2 – 35x	51
Figura 43: Superfície da fratura – parafuso fraturado 2 – 1300x	52
Figura 44: Superfície da fratura – parafuso fraturado 2	53
Figura 45: Meio da fratura – parafuso fraturado 2	53
Figura 46: Superfície lateral da fratura (região dos filetes) – parafuso fraturado 2	54
Figura 47: Superfície lateral da raiz do filete (início da fratura) – parafuso fraturado 2	54
Figura 48: Superfície da raiz do filete – Parafuso empenado 3	55
Figura 49: Superfície da raiz do filete – parafuso novo 4	56
Figura 50: Superfície da raiz do filete – parafuso novo 4 – 120x	57

Figura 51: Superfície lateral da raiz do filete – parafuso novo 4	58
Figura 52: Superfície da raiz do filete – parafuso novo 4 – 120x	58
Figura 53: Superfície da raiz do filete – parafuso novo 4	59
Figura 54: Superfície da raiz do filete – parafuso novo 4	60
Figura 55: Superfície lateral plana do parafuso – parafuso novo 4	60
Figura 56: Superfície lateral plana do parafuso – parafuso novo 4 – 1699x	61
Figura 57: Amostras embutidas analisadas	62
Figura 58: Superfície lateral da raiz do filete (início da fratura) – parafuso fraturado 1.....	63
Figura 59: Superfície lateral da raiz do filete (outra região) – parafuso fraturado 2	64
Figura 60: Superfície lateral da raiz do filete – parafuso empenado 3	65
Figura 61: Superfície lateral da crista do filete – parafuso novo 4.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis e indicadores.....	25
Tabela 2: Especificações do parafuso de roda.....	31
Tabela 3: Comparativo Pneumática antiga e nova	38
Tabela 4: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso fraturado 1	47
Tabela 5: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso fraturado 1	48
Tabela 6: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso fraturado 2	52
Tabela 7: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso fraturado 2	52
Tabela 8: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso novo 4.....	57
Tabela 9: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso novo 4.....	59
Tabela 10: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso novo 4.....	61
Tabela 11: Resultados obtidos nas análises metalográficas	67

LISTA DE SIMBOLOS

EDS – Detector de Energia Dispersiva

FTA - Análise de Árvore de Falhas

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira

RCFA - Análise da Causa-Raiz de Falhas

RCM - *Reliability-Centered Maintenance*

TPM - Manutenção Produtiva Total

6M - Máquina, Método, Medida, Meio Ambiente, Mão de Obra e Material

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral	4
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Manutenção: Conceito e evolução.....	5
2.1.2	Falhas.....	7
2.1.3	Manutenção Centrada em Confiabilidade	10
2.2	Ferramentas de investigação de causas	11
2.2.1	Análise da Causa-Raiz de falha (RCFA).....	12
2.2.2	Diagrama de Ishikawa	14
2.2.3	Método dos Porquês	15
2.3	Fratura.....	16
2.4	Fadiga	17
2.5	Análise com Microscópio Eletrônico de Varredura	19
2.6	Análise Metalográfica.....	21
3	METODOLOGIA.....	22
3.1	Tipo de pesquisa	22
3.2	Materiais e Métodos	23
3.3	Variáveis e Indicadores	24
3.4	Instrumento de coleta de dados	25
3.5	Tabulação dos dados.....	26
3.6	Considerações Finais do capítulo	26
4	RESULTADOS.....	27
4.1	Características da empresa.....	27
4.2	Características do equipamento	27
4.2.1	Rodas	28
4.3	Análise do processo de manutenção	31

4.3.1	Diagrama de Ishikawa	34
4.3.2	Método dos Porquês	36
4.4	Análise do parafuso	40
4.4.1	Análise Macrográfica	42
4.4.2	Análise com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	45
4.4.3	Análise Metalográfica.....	62
4.5	Discussão dos resultados	67
4.6	Recomendações	69
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	70
5.1	Conclusão	70
5.2	Recomendações	71
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	72

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Com a elevação da competitividade no mercado, torna-se indispensável que as empresas adotem estratégias de manutenção eficientes, capazes de ampliar a disponibilidade dos equipamentos. Isso porque a falha de um componente essencial pode resultar na paralisação de toda a linha de produção.

De acordo com Lima e Teixeira (2006), a mineração é um dos eixos da economia brasileira que contribui para a geração de empregos, renda e para a exportação total do país.

Segundo IBRAM (2015), um dos principais elementos de competitividade da indústria de mineração é a eficiência operacional. Para tanto, a disponibilidade física do equipamento é essencial para o apoio à estratégia. Uma forma de garantir a disponibilidade física é por meio de eficientes sistemas de gestão de manutenção.

Segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção pode ser vista como a atividade que assegura o pleno funcionamento de equipamentos e instalações, permitindo a continuidade do processo produtivo. Além disso, desempenha papel essencial na proteção ambiental, sendo conduzida com foco em confiabilidade, segurança e viabilidade econômica.

Para Xenos (2004), a manutenção pode ser realizada por meio de diferentes métodos, como a corretiva, a preventiva e a preditiva, entre outros. Quando empregados corretamente, esses métodos favorecem a eficiência econômica do processo produtivo, garantindo maior utilização dos equipamentos, redução das despesas, elevando a produtividade e reduzindo as falhas.

Paccola (2017) explica que os custos podem ser reduzidos e que o aumento da confiabilidade e da disponibilidade física dos equipamentos e instalações pode ocorrer, desde que haja ações para que estes cumpram a vida útil esperada, reduzindo o índice de manutenções corretivas e tendo rotinas de inspeções bem definidas.

O programa Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) estuda as diversas formas de como um componente pode vir a falhar com o objetivo de adotar ações de bloqueios pertinentes, ou seja, essa metodologia visa aumentar a vida útil dos itens físicos e reduzir os custos das atividades de manutenção, uma vez que ela estabelece a melhor estratégia para gerenciamento das falhas e propõe metodologias para aumentar a confiabilidade de um sistema (VIANA, 2008)

Conforme Dieter (1981), dentre os modos de falha mais recorrentes em metais estão a fadiga e a fratura. Ainda segundo Dieter (1981), a fratura, por sua vez, pode apresentar comportamento frágil ou dúctil, dependendo tanto do tipo de solicitação aplicada quanto das características estruturais e microestruturais do material.

De acordo com Wulpi (1999), o termo “fratura” refere-se à perda da integridade física de um componente, de forma que ele fique incapaz de desempenhar sua função e pode estar atrelada a diversos fatores, como erros de projeto e/ou fabricação da peça, falta de manutenção, localização do equipamento em condições ambientais inadequadas, sobrecarga, combinação destes e outros fatores etc.

De acordo com a Miller (2002), a fratura é uma das falhas mais frequentes em metais e, por isso, a análise de falhas é uma ferramenta fundamental para identificar suas causas, compreender os mecanismos envolvidos e propor medidas corretivas.

Para Miller (2002), a análise de falha é um trabalho investigativo realizado após a ocorrência da fratura do material e que objetiva determinar a causa raiz da fratura para prevenir a repetida ocorrência em peças semelhantes em casos futuros. Para tal, são realizados registros fotográficos e análises técnicas em microscopia óptica e eletrônica, que permitem deduzir os mecanismos de propagação de trincas da peça fraturada.

Este trabalho trata do estudo da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) com o uso da Análise da Causa-Raiz de Falha (RCFA) aplicando as técnicas do Diagrama de Ishikawa e o Método dos Porquês para realizar a análise de falha da soltura de rodas de uma frota de caminhões de uma mineradora, onde alguns parafusos estavam fraturando, causando a soltura das rodas. Estes equipamentos estão diretamente relacionados com todo o processo produtivo de uma mineradora, e a falha ou interrupção das atividades dessas máquinas pode acarretar grandes transtornos para o bom andamento da produção da empresa, influenciando negativamente a rentabilidade dela.

A partir do que foi contextualizado, tem-se a seguinte problemática:

Como aplicar a MCC para investigação das causas de soltura das rodas de caminhões em uma mineradora?

1.2 Justificativa

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), os investimentos na mineração no Brasil chegaram a R\$ 209 bilhões em 2020, uma alta de 36% com relação ao ano anterior.

Assim, tem ocorrido uma corrida pela expansão das mineradoras pelo mundo. A oferta cada vez mais maciça do minério de ferro fez com que as empresas tornassem suas operações enxutas e sem margem de erros e gastos desnecessários.

De acordo com o Guia da Caterpillar (2009), o transporte de minério e de estéril em uma mina pode chegar a representar até 60% do custo operacional total de lavra. Dentre os principais equipamentos estão os caminhões movidos a diesel, os quais representam uma quantidade significativa da frota e sua indisponibilidade pode causar grandes prejuízos.

Na perspectiva de Teles (2018), a manutenção sempre busca maior previsibilidade quanto à disponibilidade de instalações e equipamentos para criar ações que mitiguem as quebras catastróficas, reduzindo impactos improdutivos e reduzindo os custos.

Para otimização da manutenção, Rausand & Hoyland, apud Fogliatto et al. (2011), ressaltam que muitas indústrias têm percebido a conexão entre a atividade em questão e a confiabilidade, por meio da adoção de programas de confiabilidade. Tais programas têm por objetivo, além de otimizar a manutenção, reduzir custos. Assim, promovem-se melhorias na disponibilidade e segurança dos equipamentos.

Segundo Verzani (2021) a manutenção centrada na confiabilidade (MCC), tem, em uma das fases, a análise dos efeitos das falhas, que é a etapa de relacionar todos os efeitos de falha que podem prejudicar a produtividade, a segurança e outros equipamentos.

Para Kardec e Nascif (2015) a manutenção centrada na confiabilidade (MCC) é uma metodologia que estuda e analisa como o equipamento pode falhar e defini a melhor forma de fazer manutenção de modo a prevenir ou minimizar a falha, por isso ela contribui para esse estudo com a utilização das técnicas do Diagrama de Ishikawa e o Método dos Porquês para buscar a causa raiz da soltura de roda de uma frota de caminhões.

Considerando a representatividade da operação de carregamento e transporte no setor mineral e o impacto que a indisponibilidade de ativos pode gerar para esse setor, o estudo da Manutenção Centrada na Confiabilidade e da Análise de Causa-Raiz de Falha podem contribuir significativamente para aumento da confiabilidade, permitindo a priorização do tratamento de falhas e melhoria de processos que podem gerar reduções significativas de gastos operacionais e de manutenção.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Aplicar as técnicas da MCC para análise de falha de solda de rodas de uma frota de caminhões, buscando encontrar a causa raiz.

1.3.2 Específicos

- Realizar um estudo bibliográfico sobre: manutenção, manutenção centrada em confiabilidade, metodologias de tratamento de falhas, fratura, fadiga e análise microscópica e metalográfica;
- Elaborar um processo metodológico para analisar a causa raiz da fratura dos parafusos de roda;
- Analisar por macroscopia e microscopia os parafusos de roda;
- Determinar a causa raiz para a fratura dos parafusos de roda;
- Propor melhoria para evitar novas ocorrências de falha.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho será dividido em 5 capítulos que se apresentam da seguinte forma: No primeiro capítulo são apresentados a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos de manutenção, manutenção centrada na confiabilidade, metodologia de tratamento de falhas, fratura, fadiga e análise microscópica e metalográfica. O terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas de análise utilizadas.

O quarto capítulo é composto pela análise do processo de manutenção, com metodologias para investigação das causas raiz para essa falha e o resultado da análise macroscópica, microscópica e metalográfica dos parafusos de roda. E por fim, o capítulo quinto trata das conclusões e recomendações acerca do caso estudado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manutenção: Conceito e evolução

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 5462 (1994), a manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em estado no qual este possa desempenhar uma função requerida.

Kardec e Nascif (2015) explicam que a manutenção é uma maneira de garantir a confiabilidade e disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de tal forma que possa atender a um processo de produção ou de serviço, prevalecendo a segurança, o meio ambiente e custos adequados.

Conforme demonstra Gregório (2018), a manutenção pode ser um conjunto de ações técnicas e administrativas com o objetivo de manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. A função requerida de um item é o conjunto de funções necessárias para realizar determinada ação.

De acordo com Moubray (1997), a evolução da manutenção pode ser dividida em três gerações, sendo que a primeira se estende até o período da Segunda Guerra Mundial. Nesse período, as indústrias eram pouco mecanizadas e utilizavam equipamentos simples e superdimensionados. Ainda segundo Moubray (1997) esse superdimensionamento conferia aos equipamentos elevada confiabilidade e facilidade de reparo, tornando desnecessárias intervenções sistemáticas, limitando-se as manutenções a tarefas básicas como limpeza, lubrificação e pequenas assistências.

Para Kardec e Nascif (2015), durante esse período, a visão era de que as falhas eram algo natural e que ocorriam devido aos desgastes do equipamento com a idade. Ainda segundo Kardec e Nascif (2015), dessa maneira, somente após a ocorrência da falha, os responsáveis buscavam soluções e empregavam o método de manutenção corretiva, que tem suas habilidades voltadas para o reparo do ativo. Como a produtividade não era prioridade devido à conjuntura econômica da época, não existia uma manutenção sistematizada.

De acordo com Souza e Borges (2019), a segunda geração ocorreu entre as décadas de 1940 e 1970, período caracterizado pelo avanço da mecanização e pelo aumento da complexidade nas linhas de produção. Ainda para Souza e Borges (2019), foi nessa fase que a manutenção preventiva passou a ganhar espaço, baseada em intervenções programadas de

acordo com o tempo de uso ou a carga de operação do equipamento. O objetivo era diminuir a incidência de falhas, embora essa prática nem sempre fosse eficaz, já que frequentemente resultava na troca de peças que ainda apresentavam condições satisfatórias de funcionamento.

Segundo Jardim (2007), a terceira geração da manutenção teve início na década de 1970 e foi marcada por importantes avanços, como a incorporação da manutenção preditiva e da análise de falhas. Jardim (2007) também acrescenta que com o uso de técnicas de monitoramento de condição — entre elas a análise de vibrações e a termografia — tornou-se viável antecipar falhas com maior exatidão, o que possibilitou a redução de custos e o aumento da confiabilidade dos sistemas. Esse período consolidou a aproximação entre manutenção e engenharia, promovendo melhorias relevantes em segurança e na disponibilidade dos ativos.

Apesar de todo o avanço da terceira geração, Kardec e Nascif (2015) ressaltam que os equipamentos ainda apresentavam uma elevada taxa de falha no seu estágio inicial de operação e isso ocorria devido à falta de interação entre as áreas de engenharia, manutenção e operação. Logo, ao fim da terceira geração, ainda havia a necessidade de promover uma interação entre as áreas para melhorar ainda mais os resultados.

Kardec e Nascif (2015) inseriram também a quarta e a quinta geração para a manutenção, onde a quarta consolidou a disponibilidade e a confiabilidade, com a minimização das falhas prematuras (mortalidade infantil) sendo um dos desafios da quarta geração. Segundo os autores, para que essas falhas sejam minimizadas, é importante que os setores envolvidos no processo produtivo tenham ampla comunicação entre si e participem ativamente do processo de produção. A Figura 1 evidencia a evolução da manutenção, incluindo as 5 gerações.

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO											
Geração	Primeira Geração		Segunda Geração		Terceira Geração		Quarta Geração		Quinta Geração		
Ano	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2005	2010	2015	
Aumento das expectativas em relação à Manutenção	• Conserto após a falha		• Disponibilidade crescente • Maior vida útil do equipamento		• Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Melhor relação custo-benefício • Preservação do meio ambiente		• Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Preservação do meio ambiente • Segurança • Gerenciar ativos • Influir nos resultados do negócio		• Gerenciar os ativos • Otimizar os ciclos de vida dos ativos • Influir nos resultados do negócio		
Visão quanto à falha do ativo	• Todos os equipamentos se desgastam com a idade e por isso falham		• Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira		• Existência de 6 padrões de falhas (Nowlan & Heap e Moubray) Ver Capítulo 5		• Reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões A e F. (Nowlan & Heap e Moubray) Ver Capítulo 5		• Planejamento do ciclo de vida desde o projeto para reduzir falhas		
Mudança nas técnicas de manutenção	• Habilidades voltadas para o reparo		• Planejamento manual da manutenção • Computadores grandes e lentos • Manutenção preventiva (por tempo)		• Monitoramento da condição • Manutenção preditiva • Análise de risco • Computadores pequenos e rápidos • Softwares potentes • Grupos de trabalho disciplinares • Projetos voltados para a confiabilidade		• Aumento da manutenção preditiva e monitoramento da condição • Redução nas manutenções preventiva e corretiva não planejada • Análise de falhas • Técnicas de confiabilidade • Manutenibilidade • Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade • Contratação por resultados		• Aumento da manutenção preditiva e monitoramento da condição on e off-line • Participação efetiva no projeto, aquisição, instalação, comissionamento, operação e manutenção dos ativos • Garantir que os ativos operem dentro de sua máxima eficiência • Implementar melhorias objetivando redução de falhas • Excelência em engenharia de manutenção • Consolidação da contratação por resultados		

Figura 1: Evolução da Manutenção
Fonte: Kardec e Nascif (2015)

Por fim, a quinta geração, vinculada à Indústria 4.0 e às tecnologias digitais, caracteriza-se pela manutenção prescritiva e pela sistemática da Gestão de Ativos. Nessa etapa, a manutenção torna-se altamente automatizada, capaz de prever falhas em tempo real e sugerir ações otimizadas, contribuindo diretamente para a redução de custos e para o aumento da eficiência produtiva. (SOUZA; BORGES, 2019).

2.1.2 Falhas

Conforme a NBR 5462 (1994), a falha é entendida como a perda da capacidade de um item de executar a função para a qual foi projetado. Em outras palavras, trata-se da interrupção total ou parcial do desempenho esperado de uma peça, componente ou equipamento, resultando na incapacidade de atender ao padrão estabelecido. Nesses casos, torna-se necessária a realização de reparo ou a substituição do item para restabelecer sua função original.

Segundo Norton (2013), um item falha quando suas deformações atingem um nível que compromete seu funcionamento em relação ao projeto original. O autor acrescenta que as causas de falha variam conforme o tipo de material: materiais dúcteis apresentam

deformações significativas antes da ruptura, enquanto materiais frágeis tendem a quebrar sem alterações perceptíveis em sua forma.

Segundo Callister (2008), a falha de materiais é quase sempre um evento indesejável por vários motivos: vidas humanas que são colocadas em perigo, perdas econômicas e a interferência na disponibilidade de produtos ou serviços.

Para Dieter (1981) embora as causas da falha e do comportamento de materiais possam ser conhecidas, a prevenção de falhas é uma condição difícil de ser garantida. As causas usuais são a seleção e o processamento dos materiais de uma maneira não apropriada e o projeto inadequado do componente ou sua má utilização.

Oreda (2002) divide as falhas pelo impacto causado e sua divisão está em três tipos: a falha crítica, muitas vezes chamada também de falha funcional, que causa perda imediata e total da função do sistema; a falha degradada que causa perda parcial da função e pode se transformar numa crítica e; a falha incipiente que não causa uma perda de função, mas pode vir a se transformar numa degradada ou crítica. A Figura 2 evidencia os três tipos de falhas.

Impacto da Falha	Definição	Nota
Falha crítica	Falha de Função/equipamento que causa a imediata cessação da capacidade da função requerida	Inclui falhas que requerem a imediata ação para que cesse o desempenho da função, mesmo que a operação atual continue por um curto período de tempo. Uma falha crítica pode resultar em um reparo não programado
Falha degradada	Falha que não cessa a função fundamental (defeito), mas compromete uma ou várias funções	A falha pode ser gradual, parcial ou ambos. A função pode ser comprometida por qualquer combinação de redução, aumento ou comportamento errático dos resultados. Um reparo imediato pode ser normalmente adiado, mas com o tempo tais falhas podem desenvolver uma falha crítica se ações corretivas não forem tomadas.
Falha incipiente	Imperfeição no estado ou condição (defeito) de um item, de forma que uma falha degradada ou crítica seja (ou não) eventualmente o resultado esperado se medidas corretivas não forem tomadas.	

Figura 2: Escala de impacto da falha
Fonte: Adaptado do OREDA (2002)

Já Lafraia (2014) considera que em geral há três tipos básicos de falha, de acordo com sua evolução em relação ao tempo:

1. Falhas prematuras/precoces (ou mortalidade infantil) – ocorrem no início da vida do equipamento ou componente, motivadas por defeitos de projeto, falhas na fabricação, uso intensivo inicial, etc.
2. Falhas aleatórias/casuais (ou de “vida útil”) – ocorrem durante o tempo médio de operação, quando o equipamento funciona sob condições normais, falhas que aparecem de maneira aleatória, muitas vezes imprevisíveis ou de causas variadas.
3. Falhas por desgaste (velhice) – associadas ao envelhecimento, deterioração contínua, fadiga, corrosão, etc., que aumentam conforme passa o tempo ou o número de ciclos de uso.

Um modelo muito utilizado na análise e identificação de falhas está relacionado a um gráfico denominado curva da banheira. Esse nome se dá devido ao formato da curva do gráfico de acordo com o tempo de vida útil dos equipamentos (REIS e ANDRADE, 2009). Na figura 3 é retratada a curva da banheira com os tipos de falha.

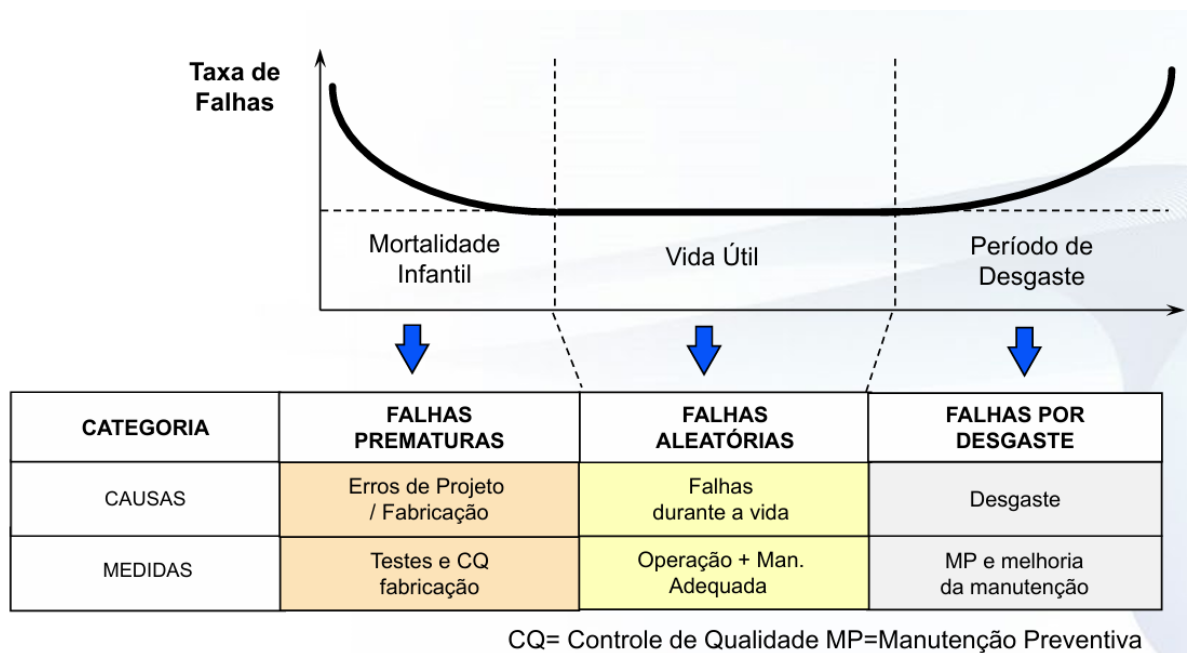


Figura 3: Taxa de falhas e o ciclo de vida
Fonte: Lafraia (2014)

Xenos (1998) afirma ainda que existem muitas causas para as falhas nos equipamentos. Colocando de forma simples, segundo o autor, existem três grandes categorias de causas: falta de resistência, uso inadequado ou manutenção inadequada.

- A falta de resistência é uma característica do próprio equipamento e resulta de deficiências de projeto, erros nas especificações dos materiais, dificuldades nos 23 processos de fabricação e montagem. Neste caso, as falhas resultarão da aplicação de esforços normais – que os equipamentos não foram projetados para aguentar.

- O uso inadequado significa a aplicação de esforços que estão fora da capacidade do equipamento e pode resultar em erros durante sua operação;

- A manutenção inadequada significa que as ações preventivas para evitar a deterioração dos equipamentos são insuficientes ou não estão sendo corretamente tomadas.

2.1.3 Manutenção Centrada em Confiabilidade

Para Lafraia (2014), a confiabilidade está diretamente relacionada com a confiança que se tem em um determinado produto, equipamento ou sistema, ou seja, que este não apresente falhas, esteja em condições operacionais, como evidencia a Figura 4.

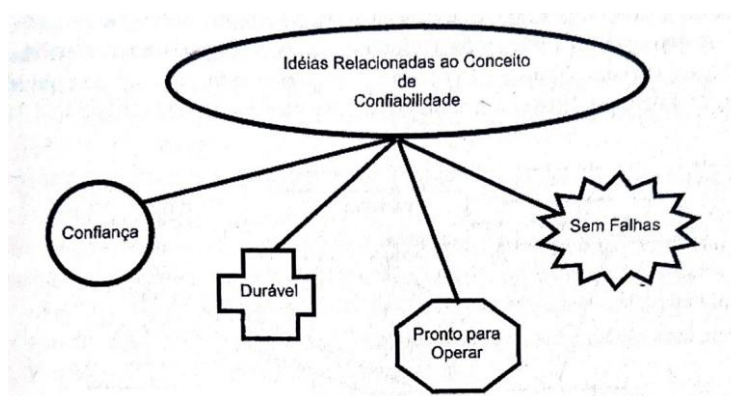


Figura 4: Ideias relacionadas ao conceito de Confiabilidade
Fonte: Lafraia (2014)

Pela NBR 5462-1994, a confiabilidade é a capacidade de um item de desempenhar uma função requerida, sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo.

Fogliatto e Ribeiro (2009) relatam que a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) pode ser definida como um programa que reúne técnicas de engenharia a fim de garantir a disponibilidade de um equipamento na linha de produção, ou seja, visa assegurar que o ativo continuará realizando as funções especificadas.

Kardec e Nascif (2009) relatam que o programa MCC estuda o equipamento ou sistema em detalhes, analisa como ele pode falhar e define a melhor forma de fazer a manutenção a fim de minimizar ou prevenir as perdas decorrentes dessa falha. Corroborando com essas ideias,

Siqueira (2005) *apud* Kersten (2014), afirma que a metodologia do programa MCC é capaz de atribuir metas precisas aos objetivos de manutenção, para que ela atue de acordo com os modos de falha e restaure a confiabilidade e segurança após a deterioração do ativo. Ou seja, esse método auxilia na seleção de atividades de manutenção úteis e condizentes com a realidade vivenciada pela organização.

Fogliatto e Ribeiro (2009) relatam que a eficácia do programa MCC depende de alguns pilares, entre os quais os autores destacam cinco:

1. Amplo envolvimento dos engenheiros, operadores e técnicos de manutenção, de modo que a comunicação entre os setores seja eficiente e que haja colaboração entre eles;
2. Ênfase no estudo e entendimento das consequências das falhas, de modo que as tarefas de manutenção sejam direcionadas pelo estudo das causas fundamentais das falhas, suas consequências e meios de evitá-las;
3. Abrangência das análises, que consideram questões associadas à segurança, meio ambiente, operação e custo, uma vez que esses são cuidados cada vez mais exigidos pelo mercado;
4. Priorizar atividades de manutenções que envolvam tarefas preditivas e preventivas;
5. Procurar e combater as falhas escondidas, que reduzem a confiabilidade do sistema.

Uma vez que esses pilares estejam consolidados, a execução do programa MCC contemplará algumas questões básicas que conduzirão ao entendimento dos modos e efeitos das falhas dos equipamentos a fim de determinar a melhor estratégia de manutenção para o ativo.

2.2 Ferramentas de investigação de causas

Segundo Aguiar (2014) analisar o modo de falha e a causa raiz consiste em estudar um problema buscando entender o que ocorreu, por que ocorreu e o que fazer para evitar a reincidência do problema. Como essa análise é um processo que envolve várias etapas e que demanda tempo, geralmente os problemas a serem analisados são priorizados com base na sua

frequência de ocorrência (AGUIAR, 2014). A Figura 5 mostra um fluxo da falha até a causa raiz.

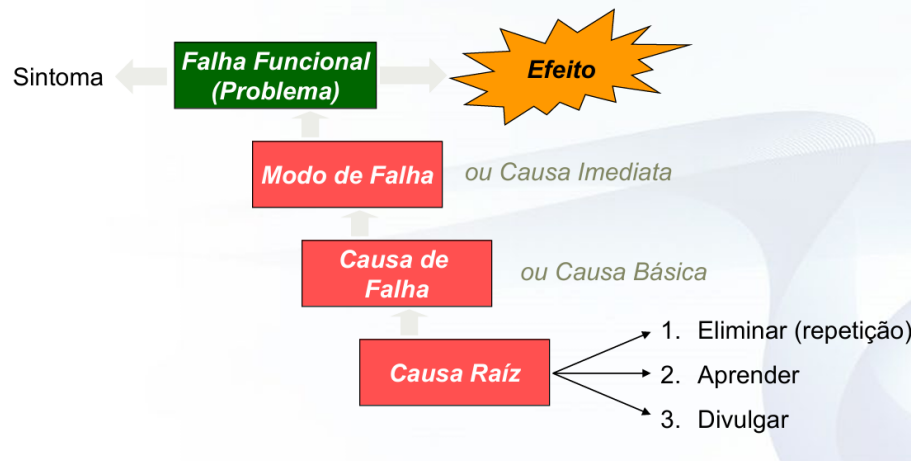


Figura 5: Fluxograma Causa Raiz
Fonte: Lafraia (2014)

De acordo com Timoteo (2018), o desenvolvimento de metodologias e métodos de análise de falhas surgiu da necessidade de reduzir custos e garantir maior competitividade no setor produtivo. Ainda segundo Timoteo (2018) a utilização de ferramentas voltadas ao tratamento das falhas é essencial para diminuir os impactos negativos no desempenho dos equipamentos, contribuindo para avanços em qualidade, segurança e confiabilidade. Esses métodos buscam evitar a reincidência de falhas por meio do registro do histórico de manutenção e da análise sistemática dos eventos ocorridos.

Existem diversas ferramentas para realizar tal análise, entre as quais estão os diagramas dos “porquês”. Essa ferramenta de resolução de problemas consiste em formular a pergunta “por que” até compreender a causa raiz das ocorrências (TRIVELLATO, 2010).

2.2.1 Análise da Causa-Raiz de falha (RCFA)

Para Kardec e Nascif (2015) a Análise das Causas-Raízes das Falhas (*Root Cause Failure Analysis* – RCFA) é um método ordenado de buscar a causa vários de problemas e determinar as ações apropriadas para evitar sua reincidência, nele é obrigatório o uso dos 5 Porques associado com o TPM (Manutenção Produtiva Total) que objetiva a eficácia da empresa através de maior qualificação das pessoas e melhorias introduzidas nos equipamentos. A Figura 6 retrata os principais passos para o processo de RCFA.

Passo	Principais Passos	Responsável
1	Análise do Modo e Efeito da Falha	Operação/ Manutenção
2	Preservação da informação da falha	Manutenção
3	Organização do Grupo de Análise	Gerência de Manutenção
4	Análise	Grupo de Análise
	Relatar as descobertas	
	Fazer as recomendações	
	Acompanhar os resultados	

Figura 6: Processo de RCFA
Fonte: Kardec e Nascif (2015)

Segundo Lafraia (2001), a aplicação da RCFA é um dos pilares para a melhoria contínua da manutenção, sendo essencial para reduzir custos e aumentar a disponibilidade de ativos industriais.

Para Mobley (1999), o processo de RCFA segue etapas bem estruturadas, que incluem a coleta de informações, a descrição detalhada do problema, a identificação dos modos de falha, a investigação das causas prováveis e a implementação de ações corretivas. Essa abordagem pode utilizar diversas ferramentas auxiliares, como o diagrama de Ishikawa, método dos porquês e a análise de árvore de falhas (FTA). Conforme Xenos (2014), o uso dessas ferramentas contribui para organizar a investigação e padronizar os procedimentos de manutenção, aumentando a eficácia da análise.

De acordo com Souza e Borges (2019), a identificação precisa da causa raiz não se limita a corrigir problemas pontuais, mas possibilita propor melhorias estruturais nos processos produtivos, elevando a confiabilidade e prevenindo a repetição de falhas semelhantes. Dessa forma, a RCFA deve ser considerada um investimento estratégico na gestão de ativos e na otimização do desempenho industrial.

Portanto, a RCFA, segundo Mobley (1999) e Moura (2012) constitui uma prática indispensável no contexto da manutenção moderna e da engenharia de confiabilidade. Sua adoção promove a melhoria da performance operacional, fortalece a cultura organizacional voltada para a prevenção de falhas e contribui para a sustentabilidade industrial. Como destacam Lafraia (2001) e Xenos (2014), a análise eficaz da causa raiz representa um avanço na maturidade da gestão de manutenção, tornando-se fundamental para empresas que buscam competitividade em ambientes cada vez mais exigentes.

2.2.2 Diagrama de Ishikawa

Para Corrêa (2019), o diagrama de Ishikawa, também denominado como diagrama de causa e efeito, tem a função de ajudar os gestores a refletir sobre as causas e efeitos de determinado problema e guiá-los na sua solução. Ainda segundo Corrêa (2019), o diagrama de Ishikawa foi originalmente proposto pelo engenheiro Kaoru Ishikawa no ano de 1943 e foi aperfeiçoado nos anos seguintes.

O diagrama de causa e efeito, também conhecido como espinha de peixe, pelo seu formato semelhante ao esqueleto do peixe, é um instrumento que permite apresentar a relação que existe entre o processo (efeito) e os fatores (causas) que podem afetar consideravelmente o resultado considerado (WERKEMA, 1995). A Figura 7 retrata um exemplo de Diagrama de Ishikawa.



Figura 7: Exemplo de Diagrama de Ishikawa
Fonte: Corrêa (2019)

Para Mobley (1999), no campo da manutenção e da confiabilidade, o diagrama de Ishikawa tem papel relevante no apoio a metodologias como a análise da causa raiz de falhas (RCFA). Por meio da identificação sistemática das causas potenciais, é possível direcionar esforços para eliminar a raiz do problema e não apenas tratar seus sintomas. Como ressaltam Souza e Borges (2019), essa ferramenta contribui para reduzir a subjetividade na análise e fortalece a tomada de decisão baseada em dados e evidências.

Segundo Carpinetti (2012), as principais etapas para elaboração do diagrama de Ishikawa são:

1. Fazer brainstorming com os envolvidos para levantar as possíveis causas do problema.

2. Selecionar as categorias principais de causas, tipicamente conforme os “6 M” (Máquina, Método, Medida, Meio Ambiente, Mão de Obra, Material), ou categorias que façam sentido no contexto específico.
3. Definir claramente o problema ou efeito (o "efeito" que será colocado na ponta do diagrama).
4. Desenhar o diagrama: traçar a linha principal (espinha), as ramificações principais (causas principais) e as ramificações secundárias (subcausas).
5. Coletar dados ou evidências que possam confirmar ou refinar quais causas são mais significativas.
6. Priorizar as causas mais influentes ou críticas, e a partir disso estabelecer ações corretivas ou de melhoria

2.2.3 Método dos Porquês

Segundo Kardec *et al.* (2009), a análise da causa raiz é um método ordenado realizado para encontrar as causas de um determinado problema, de modo a determinar ações para evitar a reincidência do mesmo problema. Segundo o mesmo autor, este método é relativamente fácil se comparado a outros, porém é um exercício rigoroso de investigação. A utilização da ferramenta é baseada no uso do método dos “Porquês” e em cada etapa é feita a pergunta “Por quê?” até que se chegue à causa raiz do problema.

Para Xenos (2014), o Método dos Porquês consiste em perguntar 5 vezes o porquê de um problema com o intuito de se chegar à sua causa raiz. Esse método é praticado através da visita ao local onde ocorreu o problema, da observação das evidências e do entendimento do motivo.

Souza e Borges (2019) ressaltam que, embora o número “cinco” seja tradicionalmente associado à técnica, o mais importante é questionar quantas vezes forem necessárias até que a verdadeira causa seja encontrada. Essa flexibilidade torna o método aplicável a diferentes tipos de falhas, desde problemas operacionais até falhas em sistemas críticos.

De acordo com Xenos (2014), esse método contribui para aumentar a confiabilidade dos ativos, pois reduz o risco de correções superficiais que apenas mascaram o problema sem resolvê-lo de fato.

No Método dos 5 Porquês, geralmente subentende-se que no primeiro porquê obtém-se o sintoma ou causa direta do problema, no segundo temos uma desculpa, no terceiro o culpado, no quarto a causa e no quinto a causa raiz (AGUIAR, 2014).

2.3 Fratura

Segundo Chiaverini (2005), a fratura constitui um dos principais tipos de falha em materiais metálicos e não metálicos, ocorrendo quando a tensão aplicada supera a resistência do material. Entender os mecanismos que provocam a fratura é essencial para evitar falhas graves em projetos mecânicos e estruturas.

De acordo com Padilha (2000), as fraturas podem ser divididas em dois tipos principais: dútil e frágil. A fratura dútil ocorre com grande deformação plástica antes do rompimento, enquanto a fratura frágil acontece de maneira abrupta, sem alterações significativas na forma do material. Compreender essa distinção é essencial para a escolha adequada de materiais e para estabelecer condições seguras de operação.

Para Santos e Mei (2017), a fratura dútil é marcada pela formação de estrição e grande alongamento do material antes da falha. Esse tipo de fratura é muito comum em materiais dúcteis, como aços de baixo carbono, o que os torna amplamente empregados na construção civil e na indústria automotiva.

Já a fratura frágil, segundo Chiaverini (2005), ocorre com pouca ou nenhuma deformação plástica, apresentando superfícies de clivagem e propagação rápida da trinca. Esse tipo de falha é perigoso, pois ocorre sem aviso prévio, sendo comum em materiais cerâmicos, vidros e também em alguns aços submetidos a baixas temperaturas. Na Figura 8 são evidenciados os dois tipos de fratura.



Figura 8: Tipos de fratura
Fonte: Callister (2019)

Segundo Callister (2016), outro modo relevante de falha é a fratura por fadiga, que ocorre em materiais sujeitos a carregamentos repetitivos. Esse tipo de falha é responsável por grande parte dos incidentes em serviço, especialmente em componentes de aeronaves, veículos automotores e equipamentos industriais. Segundo Padilha (2000), a fratura por fadiga se desenvolve de forma gradual, iniciando-se com a nucleação de trincas, seguida de propagação e culminando na ruptura final.

Para Callister (2016), um dos principais sinais visuais de fratura por fadiga é a chamada marca de praia (*beach mark*), que surge na superfície da fratura sob a forma de linhas concêntricas ou semicirculares. Essas marcas indicam os diferentes estágios de propagação da trinca durante os ciclos de carregamento, funcionando como um registro do progresso da falha. Conforme Padilha (2008), as marcas de praia são ferramentas valiosas em análises fractográficas, pois possibilitam identificar o ponto de origem da trinca e avaliar as condições de solicitação. Dessa forma, sua observação, seja por inspeção visual ou microscópica, auxilia engenheiros a determinar a causa raiz da falha e a propor ações corretivas adequadas.

A análise da superfície de fratura, de acordo com Callister (2016) constitui uma ferramenta fundamental para a identificação do tipo de falha. Nas fraturas dúcteis, observa-se superfície irregular e presença de microcavidades, enquanto nas fraturas frágeis predomina um aspecto granular ou facetado. De acordo com Chiaverini (2005), a fractografia é amplamente utilizada em investigações de falhas, oferecendo suporte aos engenheiros na prevenção de ocorrências semelhantes no futuro.

Portanto, entender os distintos tipos de fratura e seus mecanismos é fundamental tanto para a engenharia de projetos quanto para a manutenção. Segundo Padilha (2000), a seleção correta do material, aliada ao controle do processo de fabricação e às condições de operação, diminui de forma significativa o risco de falhas por fratura, assegurando maior confiabilidade em aplicações industriais e estruturais.

2.4 Fadiga

De acordo com Callister (2016), a fadiga constitui um dos principais modos de falha em materiais metálicos, ocorrendo por meio da ruptura progressiva sob tensões cíclicas, mesmo quando estas são inferiores ao limite de resistência estática do material. Esse processo, para Callister (2016) é resultado do acúmulo gradual de microdanos, que geralmente se

iniciam em áreas com concentração de tensões, como entalhes, cantos agudos e descontinuidades na superfície.

No contexto brasileiro, Castro e Meggiolaro (2009) destacam que a compreensão desse mecanismo é essencial para a previsão da vida em serviço e para a análise de falhas em engenharia.

Segundo Souza e Mei (2010), a fadiga em materiais pode ser compreendida como um processo que ocorre em três etapas principais: a nucleação da trinca, a propagação gradual da trinca e a fratura final, que se manifesta de forma súbita quando a seção resistente do componente não suporta mais a carga aplicada. A nucleação, ainda de acordo com Souza e Mei (2010) geralmente ocorre em regiões sujeitas a tensões concentradas, enquanto a propagação é caracterizada pelo aparecimento de marcas de praia, visíveis em análises fractográficas. A Figura 9 evidencia os estágios da fratura.

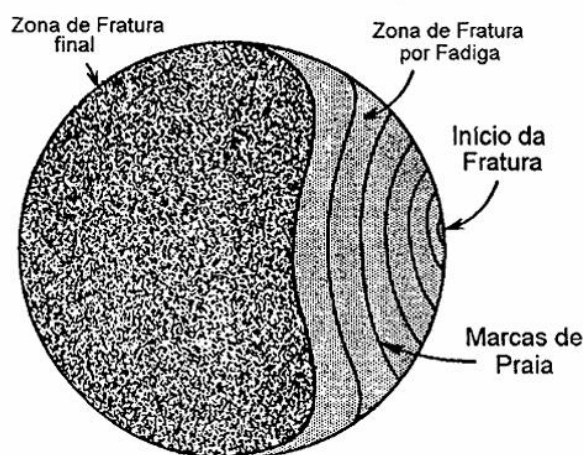


Figura 9: Fratura por fadiga
Fonte: Reed-Hill (1982)

Segundo Chiaverini (2001), um elemento crucial na análise de fadiga é o número de ciclos que o material suporta antes de falhar, conhecido como vida em fadiga. Segundo Callister (2016), o comportamento à fadiga dos materiais é representado por curvas S-N, utilizadas para prever a durabilidade de componentes. Materiais ferrosos apresentam limite de fadiga, podendo resistir indefinidamente a solicitações cíclicas abaixo desse valor, enquanto materiais não ferrosos, como ligas de alumínio, não possuem um limite de fadiga claramente definido.

Segundo Godefroid (2011), a fadiga é um processo de alteração estrutural progressivo, localizado e permanente que ocorre em um material submetido a condições que produzem

variações de tensões e deformações em um ou mais pontos e que pode culminar em trincas ou fratura completa após um número suficiente de flutuações ou ciclos.

Para Godefroid (2011), as “Marcas de Praia” são características de propagação de trincas pelos mecanismos de fadiga mecânica e esse modo de falha é um processo de degradação localizada progressiva e permanente que ocorre no material sujeito a variação nas tensões e deformações, que propicia a formação de uma trinca ou a completa fratura depois de ocorrido um número suficiente de ciclos.

Segundo Pacheco e Oliveira (2014), a resistência à fadiga de materiais é influenciada por diversos fatores, incluindo acabamento superficial, presença de entalhes, ambiente corrosivo, temperatura e tratamento térmico. Ainda de acordo com Pacheco e Oliveira (2014), as superfícies polidas tendem a retardar a formação de trincas, enquanto a corrosão acelera a propagação delas, caracterizando a fadiga corrosiva. Além disso, a escolha adequada de materiais e processos de fabricação é essencial para reduzir a ocorrência desse tipo de falha.

De acordo com Souza e Mei (2010), no ambiente industrial, a fadiga é frequentemente a causa de falhas em componentes críticos, como eixos, engrenagens, parafusos e turbinas. Segundo Mobley (1999) e Moura (2012), uma parcela significativa das falhas mecânicas é causada por fadiga, o que evidencia a necessidade de técnicas preditivas e inspeções periódicas. Ferramentas como análise de fratura, ensaios não destrutivos e monitoramento de vibração são amplamente empregadas para identificar sinais iniciais desse tipo de desgaste.

Para Pacheco e Oliveira (2014), entender os mecanismos da fadiga é fundamental para a engenharia de materiais e para garantir a confiabilidade estrutural. Ainda segundo Pacheco e Oliveira (2014), a aplicação de projetos adequados, o monitoramento dos componentes em serviço e a escolha de materiais com propriedades superiores contribuem para reduzir a probabilidade de falhas. Dessa forma, a integração entre ciência dos materiais, técnicas de manutenção e engenharia de confiabilidade é essencial para minimizar os riscos de falhas por fadiga em sistemas industriais.

2.5 Análise com Microscópio Eletrônico de Varredura

Segundo Souza e Mei (2010), a microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma ferramenta essencial para caracterização microestrutural de materiais. Ainda de acordo com Souza e Mei (2010), o contrário da microscopia óptica, que utiliza luz visível, a MEV emprega feixes de elétrons de alta energia, permitindo obter imagens com alta resolução e

grande profundidade de campo. Essa técnica possibilita analisar detalhadamente a topografia e a morfologia superficial dos materiais, sendo amplamente utilizada tanto em pesquisas científicas quanto na indústria.

Chiaverini (2001) demonstra que o funcionamento básico do MEV envolve a emissão de elétrons primários por um canhão eletrônico, que são acelerados em direção à amostra. Segundo Souza e Mei (2010), a interação dos elétrons incidentes com os átomos do material gera diferentes sinais, como elétrons secundários, retroespalhados e raios X característicos, cuja detecção permite formar imagens de alta qualidade e analisar a composição química da superfície, especialmente quando associados ao sistema de espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

De acordo com Pacheco e Oliveira (2014), a preparação das amostras para análise em microscopia eletrônica de varredura (MEV) depende do tipo de material. Para materiais condutores, Pacheco e Oliveira (2014) afirmam que o procedimento é relativamente simples, consistindo apenas na fixação da amostra em suportes metálicos. Já para materiais não condutores, como cerâmicas ou polímeros, é necessário aplicar uma fina camada condutora, geralmente de ouro ou carbono, para evitar o acúmulo de cargas elétricas e melhorar a qualidade da imagem.

Conforme ressaltam Souza e Mei (2010), outro aspecto importante da análise por MEV é a capacidade de realizar microanálises químicas localizadas por meio do EDS, que é um recurso que possibilita identificar a composição elementar de regiões específicas da amostra, como inclusões, precipitados e zonas de corrosão. Ainda para Souza e Mei (2010), essa associação amplia as possibilidades da caracterização, integrando informações morfológicas e químicas em um único procedimento analítico.

Segundo Silva (2007), as principais aplicações da MEV incluem a caracterização microestrutural de metais, ligas, polímeros, cerâmicas e compósitos. Essa técnica é fundamental na análise de falhas, pois permite identificar trincas, inclusões, corrosão localizada e mecanismos de fratura. Para Souza e Mei (2010), o uso da microscopia eletrônica de varredura em conjunto com a fractografia é fundamental para compreender as causas de falhas em componentes críticos, contribuindo para a melhoria de processos de fabricação e para a escolha adequada de materiais.

2.6 Análise Metalográfica

De acordo com Souza e Mei (2010), a análise metalográfica é uma técnica fundamental da engenharia de materiais e da metalurgia, utilizada para estudar a microestrutura dos metais e ligas. Esse método consiste na preparação adequada da amostra, seguida de observação em microscópio óptico ou eletrônico, permitindo compreender a relação entre microestrutura e propriedades mecânicas, físicas e químicas do material. Ainda para Souza e Mei (2010) a caracterização metalográfica é essencial para identificar fases, grãos, inclusões e defeitos internos que influenciam diretamente o desempenho em serviço.

Para Chiaverini (2001), o processo de preparação metalográfica envolve etapas bem definidas: corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico, onde o corte deve ser realizado de forma a não alterar a estrutura da amostra, enquanto o embutimento facilita o manuseio e o lixamento e o polimento têm como objetivo obter uma superfície lisa e livre de deformações. Por fim, o ataque químico revela os contornos de grão e outras características microestruturais, possibilitando a análise no microscópio (CHIAVERINI, 2001).

De acordo com Pacheco e Oliveira (2014), a microscopia óptica é a técnica mais utilizada na análise metalográfica, permitindo observar detalhes como tamanho de grão, fases presentes e precipitados. No entanto, em casos em que maior resolução é necessária, utiliza-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV), que possibilita análises mais detalhadas da morfologia e da composição química por meio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) (PACHECO; OLIVEIRA, 2014).

Segundo Silva (2007), a análise metalográfica tem papel importante na determinação da qualidade de um material, onde ela é frequentemente empregada em estudos de falhas, em que a observação da microestrutura permite identificar problemas como segregações, porosidades, trincas ou presença de fases indesejadas. Ainda para Silva (2007), a correlação entre defeitos microestruturais e falhas em serviço auxilia na proposição de melhorias em processos de fabricação e no aumento da confiabilidade dos componentes.

De acordo com Souza e Mei (2010), um importante campo de aplicação da análise metalográfica é o controle de qualidade em processos de produção metalúrgica, onde essa análise permite verificar a conformidade com normas técnicas, avaliar os efeitos de tratamentos térmicos e validar parâmetros de soldagem. Ainda para Souza e Mei (2010), o entendimento da microestrutura do material é fundamental para assegurar que ele atenda aos requisitos de desempenho mecânico, incluindo resistência, dureza e tenacidade.

Dessa forma, a análise metalográfica, segundo Pacheco e Oliveira (2014), constitui uma ferramenta indispensável para a engenharia, atuando tanto em pesquisas acadêmicas quanto na prática industrial e sua aplicação contribui para compreender a influência dos processos de fabricação sobre a microestrutura, além de orientar estratégias de melhoria de desempenho e de prevenção de falhas. Assim, o domínio dessa técnica é essencial para engenheiros, metalurgistas e pesquisadores envolvidos com materiais e suas aplicações (PACHECO; OLIVEIRA, 2014).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta as características dessa pesquisa científica, os materiais e métodos utilizados na coleta de dados, variáveis e indicadores envolvidos, tabulação e análise dos dados.

3.1 Tipo de pesquisa

De acordo com Castro (1976), as pesquisas científicas podem ser classificadas em três tipos, conforme seus objetivos: descritivas, explicativas e exploratórias. Conforme Gil (2008), a pesquisa exploratória tem como principal finalidade desenvolver, esclarecer e aprimorar conceitos e ideias, permitindo a formulação de problemas mais específicos ou a definição de hipóteses passíveis de investigação em estudos subsequentes.

Conforme Mattar (2001), as pesquisas exploratórias envolvem a coleta de informações em fontes secundárias, levantamento de experiências, análise de casos selecionados e observações informais do fenômeno estudado. O autor ressalta ainda que esse tipo de pesquisa costuma iniciar-se como um estudo bibliográfico, complementado posteriormente por uma investigação de caso.

Além da classificação referente aos objetivos, as pesquisas podem ser classificadas como qualitativas ou quantitativas, sendo que essas duas classificações se diferem pelo uso ou não de instrumentos estatísticos.

Para Richardson (2015), a abordagem qualitativa parte do princípio da percepção do fenômeno dentro do seu contexto, de modo que o uso dessa descrição procura captar as essências do evento, explicar sua origem e intuir suas consequências sem a necessidade de cálculos ou interpolações numéricas. Já o método quantitativo mensura tanto a modalidade de coleta de informações quanto o tratamento das mesmas por meio de técnicas estatísticas.

A partir das características apresentadas, considera-se que a natureza desse trabalho é exploratória de abordagem qualitativa, uma vez que serão analisados os modos e os efeitos da falha no período proposto, sem a necessidade de cálculos ou interpolações numéricas.

Quanto aos procedimentos técnicos abordados em uma pesquisa, podem ser de estudo de caso, pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa experimental, pesquisa-ação e pesquisa participante (SEVERINO, 2018).

Para Vergara (2004), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos, e é importante para o levantamento de informações básicas sobre os aspectos direta e indiretamente ligados à nossa temática.

Outro procedimento é o estudo de caso que segundo Bell (1989) pode ser apropriado para pesquisadores individuais, proporcionando a oportunidade para que um aspecto de um problema seja estudado de forma mais profunda, dentro de um período de tempo limitado, possibilitando ao pesquisador centrar-se em uma situação ou aspecto específico e identificar os diversos processos que interagem no contexto estudado.

Portanto, pode-se concluir que esse trabalho consiste em uma metodologia com objetivo exploratório com forma de abordagem qualitativa e com relação aos procedimentos técnicos: bibliográfico, estudo de caso e experimental nos quais ocorrem falhas operacionais devido à soltura das rodas de uma frota de caminhões.

3.2 Materiais e Métodos

A execução desse trabalho teve como ponto inicial uma revisão bibliográfica a partir de artigos, livros, dissertações e publicações na área de manutenção, metodologias de análise de falhas, propriedades dos materiais, ensaios mecânicos e fratura com o propósito de aprofundar os conhecimentos que podem contribuir com uma análise de falhas de uma fratura de parafusos de roda de uma frota de caminhões.

Uma empresa terceirizada de uma grande mineradora possuía uma frota de 18 caminhões-báscula. Após a ocorrência de 4 solturas de roda dianteira e recorrência de afrouxamento de parafusos de roda, foi evidenciada a necessidade de realizar uma Análise de Falha para buscar identificar a causa raiz e mitigar esse problema, que além de estar impactando financeiramente a mineradora, também se tornou uma questão de segurança, visto que a soltura de roda é um acidente que pode impactar a segurança dos colaboradores.

A partir desse estudo, foi desenvolvida uma metodologia para continuação do objetivo proposto. Essa metodologia é dividida em quatro etapas e está representada no diagrama da Figura 10.

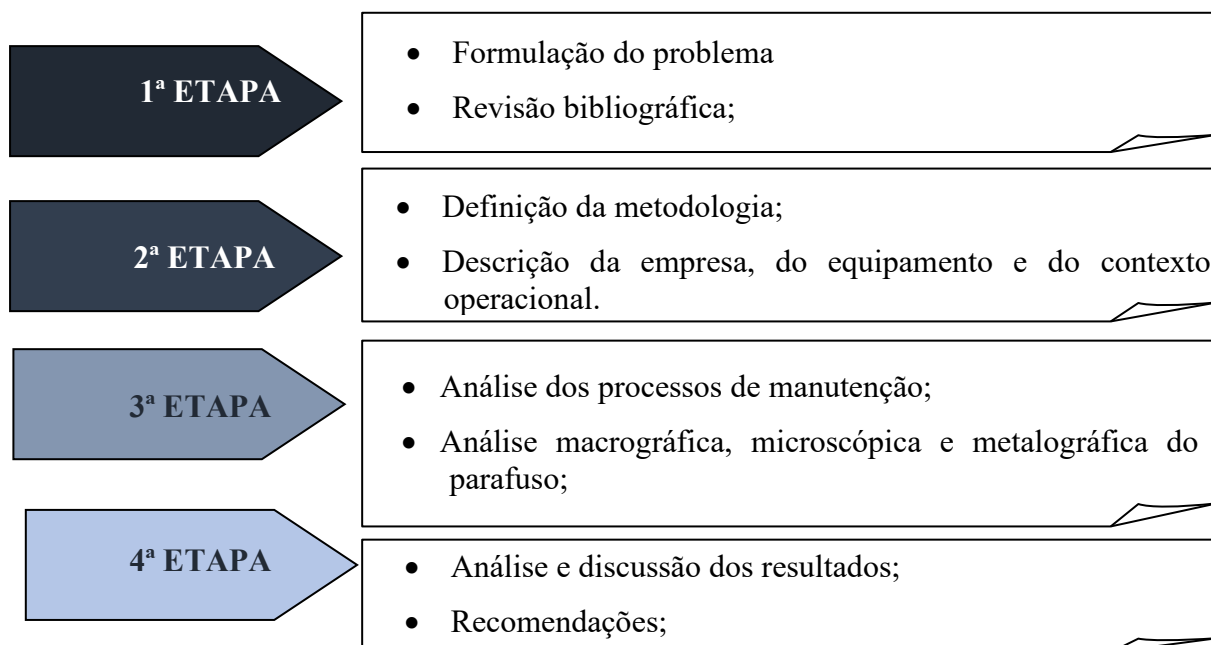


Figura 10: Materiais e Métodos
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Como se pode observar no diagrama da Figura 17, na primeira etapa são realizadas a formulação do problema e a revisão bibliográfica.

Na segunda etapa, é realizada uma descrição sobre o parafuso e o contexto operacional dos caminhões que podem ajudar a entender a causa da falha.

A terceira etapa é dividida em 2 partes, na qual, na primeira parte, é feita uma análise dos processos de manutenção da empresa e do histórico de falhas do equipamento, utilizando ferramentas de análise de falha, como o Diagrama de Ishikawa e o Método dos Porquês; na segunda, é feita uma análise do parafuso, envolvendo análise macroscópica e microscópica.

A quarta e última etapa é a análise e discussão dos resultados e recomendações feitas a partir dos dados coletados e das análises realizadas.

3.3 Variáveis e Indicadores

Pode-se considerar uma variável como classificação ou medida; uma quantidade que varia; um conceito operacional, que contém ou apresenta valores; aspectos, propriedades ou fatores discerníveis em um objeto de estudo e passíveis de mensuração; e os indicadores são

valores acrescentados que caracterizam e quantificam essas variáveis (LAKATOS, 2003). Desse modo, as variáveis e os indicadores deste trabalho podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Análise de falha	Sistema de tratamento de falhas
	Tipos de falhas
	Plano de manutenção
	Equipamento
	Método dos Por Quês
	Diagrama de Ishikawa
Soltura da roda	Análise dos componentes

Fonte: Pesquisa direta (2025)

As variáveis adotadas foram Análise de falha e a Soltura da roda, já os indicadores adotados como medida de controle para identificar a causa raiz da falha foram o Sistema de tratamento de falhas, Tipos de falhas, Plano de manutenção, Equipamento, Método do Porquês, Diagrama de Ishikawa e análise dos componentes que serão analisados ao longo da pesquisa, objetivando compreender o comportamento da falha.

3.4 Instrumento de coleta de dados

As informações sobre as falhas dos equipamentos e históricos de manutenção foram obtidas por meio de planilhas e gráficos gerados a partir de dados retirados do SAP, que é a ferramenta utilizada pela empresa para registro e controle de manutenção e estoque.

Foi realizado também acompanhamento de campo para evidenciar melhor as ferramentas e processos executados pela equipe de manutenção que possam ter relação com a falha.

Para ter uma análise mais completa, a empresa solicitou a um laboratório que fizesse alguns testes nos parafusos utilizados para complementar o estudo, visando uma busca mais assertiva da causa raiz da falha do equipamento.

As amostras da região da fratura, filete e amostras polidas foram analisadas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado ao espectrômetro de energia dispersiva de raios X (EDS). As amostras para análises metalográficas foram analisadas por microscopia ótica com e sem ataque químico.

Portanto, os instrumentos de coleta de dados envolvem observação direta tanto das planilhas disponíveis através do SAP e do Excel quanto do processo e da execução da manutenção em campo e da análise documental a partir dos ensaios realizados nos parafusos pelo laboratório.

3.5 Tabulação dos dados

Os dados foram tabulados através do Microsoft Excel, que extrai as informações contidas no SAP, que é o sistema utilizado pela empresa para controle e análise de dados de manutenção, permitindo uma melhor visualização das informações coletadas. Os registros dos resultados foram realizados por meio do Microsoft Word e do Excel.

3.6 Considerações Finais do capítulo

Nesse capítulo foram apresentados o tipo de pesquisa e metodologia utilizados, os materiais e métodos para o processo experimental que abordou os procedimentos técnicos necessários para obtenção e caracterização das amostras dos parafusos. Foram apresentados as variáveis e seus indicadores e relacionados, também, os instrumentos utilizados nos ensaios e para a coleta de dados. Por fim, foram evidenciadas as ferramentas utilizadas para tabulação dos dados, permitindo uma melhor análise deles.

O capítulo a seguir aborda o estudo de caso, apresentando uma análise do processo de manutenção e uma análise aprofundada dos parafusos para o desenvolvimento da metodologia abordada neste estudo, e a análise e discussão dos resultados obtidos.

4 RESULTADOS

4.1 Características da empresa

A empresa em questão é uma terceirizada que presta serviço em várias mineradoras do Brasil e atua em segmentos logísticos tais como logística dedicada, gestão de frota e terceirização de frota.

A divisão de “Logística dedicada” engloba contratos com o fornecimento de equipamentos com mão de obra inclusa, incluindo operadores, motoristas, mecânicos, técnicos de segurança, instrutores e toda a mão de obra necessária para a atuação dos equipamentos dentro do cliente.

O contrato em questão é de logística dedicada e a carga que é movimentada pelos caminhões é de minério de ferro. Esse minério é encontrado em rochas na natureza e, por isso, sua extração envolve diversos equipamentos, entre eles, caminhões-báscula de diversos tamanhos. A frota em questão é de 18 caminhões-báscula com capacidade de carga de 40 toneladas cada um.

4.2 Características do equipamento

O caminhão em questão é um modelo 8x4, onde os "8" se refere às oito rodas no total e "4" indica que quatro delas são tracionadas, tendo 4 eixos no total. Os sistemas desses caminhões são robustos e geralmente projetados para operações pesadas, como mineração ou construção civil. Seus sistemas podem variar desde o reforçado chassi e suspensão para carga pesada até a mais avançada tecnologia, como os modelos tele operados que são controlados remotamente, sem motorista na cabine.

Seu motor é de 500 cv de potência e possui como implemento uma bascula de 20m³, com capacidade de carga total de 40 toneladas. O regime de operação desse caminhão é de 24 horas e se desloca, em média, cerca de 46 km por dia, carregando minério de ferro que sai do processo de beneficiamento, onde as vias possuem muito barro e rejeito úmido.

Entre os principais sistemas dos caminhões estão motor, suspensão, freio, chassi e tração. No caso da falha apresentada nesse estudo, que é a soltura de rodas, temos a roda como componente principal da falha, ela faz parte dos sistemas de tração e suspensão, pois elas se conectam aos eixos, que auxiliam na suspensão e equilibram o veículo, além de serem

as responsáveis por transferir a força do motor para o solo através do sistema de transmissão (tração).

4.2.1 Rodas

O modelo 8x4 possui dois modelos diferentes de roda, sendo um modelo na parte dianteira e outro na parte traseira, totalizando oito rodas, sendo quatro rodas por eixo de tração e duas rodas para o eixo direcional dianteiro. A Figura 11 mostra a diferença visual entre esses dois modelos no caminhão deste estudo.



Figura 11: Modelos de roda do equipamento
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Conforme evidencia a Figura 11, as rodas dianteiras são mais simples para permitir o movimento de esterçamento, sua função principal é a direção, além de suportar a parte dianteira do caminhão. Já as rodas traseiras são mais robustas, pois têm como função principal suportar o peso da carga, que é a maior parte do peso total do caminhão, e fornecer tração para impulsionar o veículo. Este estudo aborda apenas as rodas dianteiras, visto que nelas foram evidenciados os eventos de soltura.

As rodas utilizadas pela empresa em questão são originais do fabricante, sendo a medida comum de 8,25 x 22,5 polegadas, com opções de modelos em aço ou alumínio, conforme a configuração de fábrica. A escolha entre aço e alumínio depende da aplicação e das opções de personalização, onde as rodas de alumínio oferecem uma alternativa mais leve, que pode contribuir para uma maior capacidade de carga líquida em certos casos e as rodas de aço são mais duráveis e robustas, ideais para operações de mineração ou com cargas mais pesadas, como é o caso da operação deste estudo.

A figura 12 mostra o parafuso fraturado em uma das rodas dianteiras que se soltou.



Figura 12: Parafuso fraturado na roda que soltou
Fonte: Pesquisa direta (2025)

As rodas que se soltaram possuem configuração em aço, que é o único modelo comprado pela empresa, e têm sempre as mesmas características da Figura 12, com fratura de parafusos, em que parte do parafuso fica alojada na roda. Já na Figura 13 mostra-se a parte do parafuso que se soltou após a fratura.



Figura 13: Parafuso de roda fraturado
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Cada roda possui 10 parafusos e, como evidenciam as figuras, na situação da soltura da roda, os parafusos são os únicos itens que compõem a roda que vieram a ter alguma falha, por isso faz-se necessário caracterizá-los melhor para ajudar na busca da causa raiz.

4.2.1.1 Parafuso de roda

Tendo em vista que a soltura das rodas tem sido uma consequência da fratura dos parafusos, foram levantados alguns dados dos parafusos de roda utilizados. A Figura 14 mostra 12 parafusos retirados para análise.



Figura 14: Parafusos coletados
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Na Figura 14 foram coletados 10 parafusos de uma roda que se soltou, 1 parafuso novo retirado do almoxarifado e um parafuso retirado de uma roda que não se soltou. Pela figura percebemos que dos 10 parafusos retirados da roda que se soltou, 8 estão fraturados e 2 empenados.

Sobre os parafusos em questão, a partir das ordens de manutenção e de dados do almoxarifado, foi possível determinar que o tempo de uso dos 10 parafusos de roda usados na roda que se soltou foi de 252 horas e também foi possível afirmar que os parafusos são componentes originais do fornecedor dos caminhões, visto que é um item que, pela política de compras da empresa, não pode ser utilizado modelos paralelos. A tabela 2 representa as especificações técnicas do parafuso de roda.

Tabela 2: Especificações do parafuso de roda

Comprimento (mm)	113
Diâmetro da rosca	7/8"
Passo da rosca (BSF)	11 BSF
Classe de resistência	10.9

Fonte: Pesquisa direta (2025)

A tabela 2 mostra o comprimento do parafuso, seu diâmetro e passo da rosca, além da sua classe de resistência, que é 10.9, indicando que o parafuso é de alta resistência e é adequado para aplicações que exigem alta carga, como é o caso do caminhão estudado.

4.3 Análise do processo de manutenção

Uma das etapas da aplicação do MCC é a análise do histórico de manutenção, por isso, para ter mais assertividade na busca da causa raiz da falha, inicialmente foi realizado um levantamento do histórico de manutenção e do processo de manutenção que envolve aperto e retirada de parafusos de roda.

Através dos dados do almoxarifado que faz o controle de entrada e saída de materiais, foi verificado um crescimento significativo do uso de parafusos de roda, principalmente a partir de dezembro de 2023. A Figura 15 mostra o aumento do consumo de parafusos de rodas entre outubro de 2023 e maio de 2024.

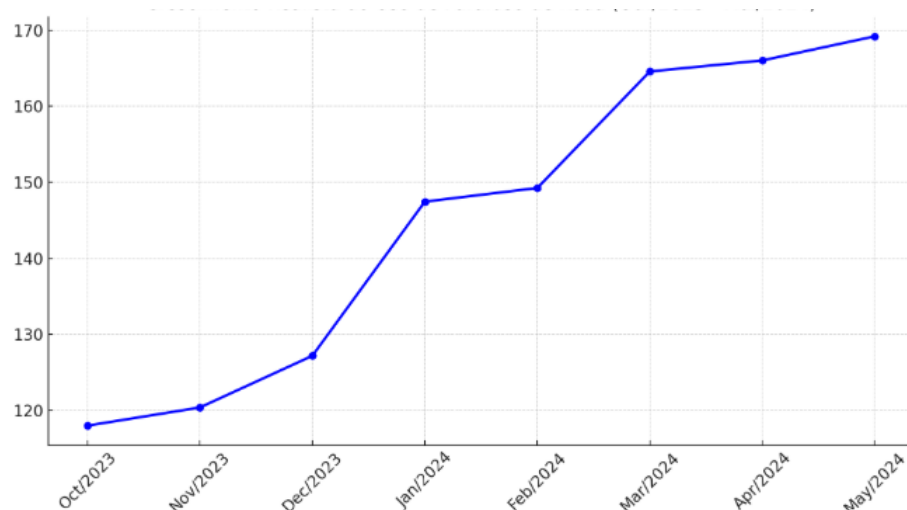


Figura 15: Consumo de parafusos de roda (out/23 a mai/24)

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Pelo gráfico da Figura 15 é possível perceber um aumento do consumo de parafusos de roda desde outubro de 2023, que teve um crescimento mais significativo a partir de dezembro de 2024 até março de 2024, onde a partir daí se manteve alto, mas sem um crescimento exponencial.

Foi verificado que todos os caminhões da frota estavam com a manutenção preventiva em dia, mas foi visto um aumento significativo das Ordens de Manutenção Corretivas relacionadas à borracharia, que incluem furos de pneu, necessidade de troca de pneu por fim de vida útil, parafusos frouxos e soltura de rodas. Na Figura 16 tem-se o gráfico evidenciando o aumento de ordens de manutenção corretivas na área de borracharia entre outubro de 2023 e maio de 2024.

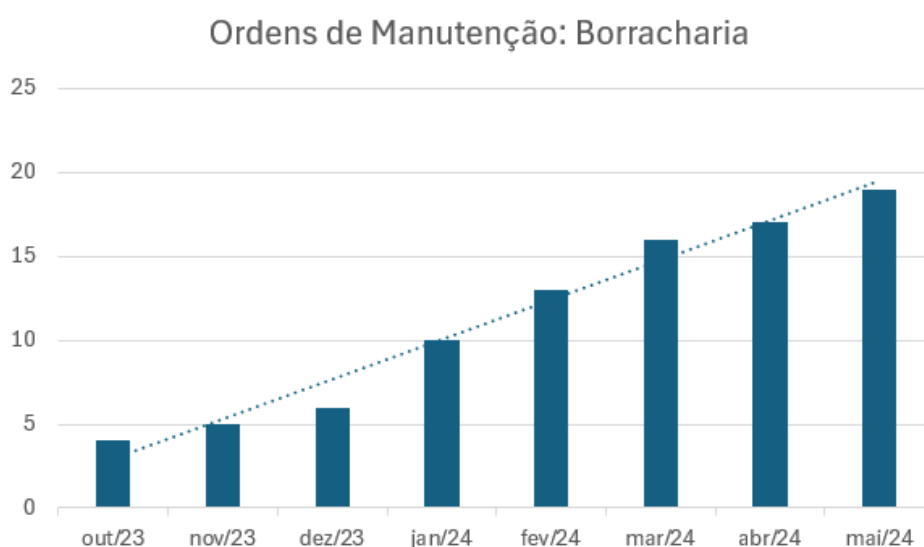


Figura 16: Quantitativo de ordens de manutenção na área de borracharia
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Pelos dados do gráfico da Figura 16, é possível perceber que houve um aumento mais significativo das corretivas de borracharia a partir de janeiro de 2024. Com isso, foi feita uma comparação com os dados do ano anterior para verificar se, de fato, esse aumento é pontual ou já acontecia no ano anterior. A Figura 17 retrata o comparativo do aumento das Ordens de Manutenção de borracharia entre os anos de 2022 e 2024.

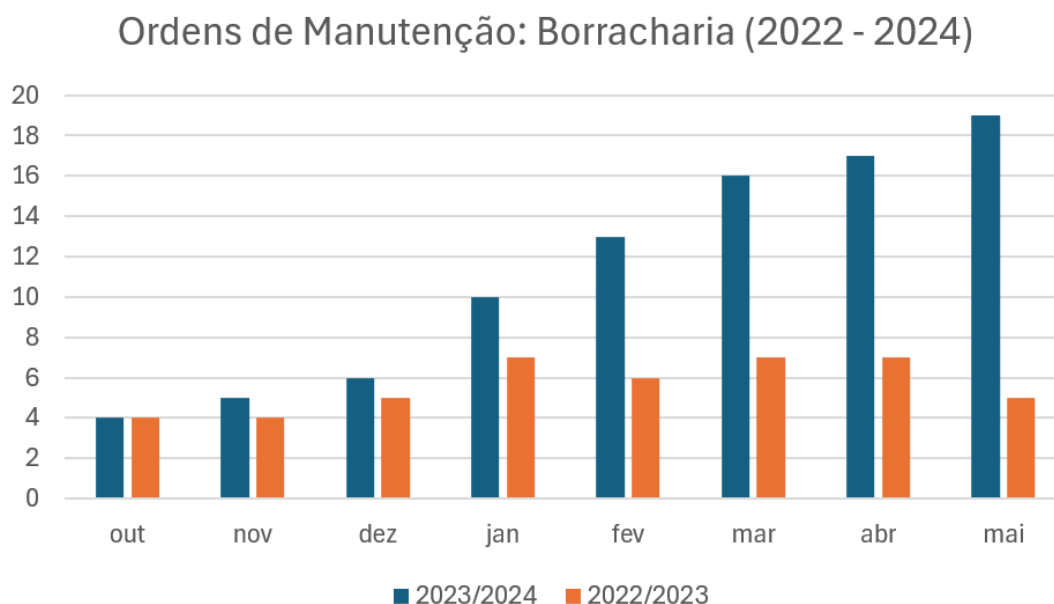


Figura 17: Comparativo de quantitativo de ordens de manutenção na área de borracharia (2022 - 2024)
 Fonte: Pesquisa direta (2025)

Pelos dados do gráfico da Figura 17, é possível perceber que, no período entre 2022 e 2023, de janeiro a abril, houve um aumento do número de ordens corretivas na área de borracharia, mas não foi tão expressivo, e esse aumento vem junto com o período de chuva, que é considerado normal. Já entre 2023 e 2024 demonstra um aumento contínuo e exponencial, evidenciando algo fora do normal da operação/manutenção.

Como a empresa não possui equipe implantada da MCC, foi reunida uma equipe multidisciplinar com um líder da operação, um líder da manutenção, um borracheiro, um engenheiro de segurança e um engenheiro de manutenção para realizar juntos um *Brainstorming* para buscar a causa raiz da falha.

Inicialmente foram analisados 4 pontos:

1. Equipe de manutenção: foi verificado se houve mudança na equipe que realizava as ordens corretivas na área de borracharia e verificou-se que contrato possuía uma equipe de borracheiros que realizar a maior parte dos serviços de borracharia e não houve alteração de pessoas no período; apenas um colaborador da equipe entrou de férias em outubro e outro em dezembro. Porém, foi realizado apenas ajuste na escala; não foi inserido outro colaborador para cobrir, pois não houve necessidade;

2. Procedimento de manutenção: foi feito um acompanhamento junto com a equipe técnica de como estavam sendo executadas as manutenções com a equipe de borracharia e foi constatado que alguns borracheiros do turno da noite não estavam usando o torquímetro no aperto de rodas, utilizando apenas a pneumática;
3. Ferramentas: foram verificadas, junto com a equipe, as ferramentas que estavam sendo utilizadas pela equipe de borracharia e constatou-se que o torquímetro estava com a aferição em dia e a pneumática que estava sendo usada também, por ser um equipamento novo;
4. Operação/Área onde veículos operam: foi constatado que os caminhões estavam seguindo as mesmas rotas e não houve variação nem do material carregado nem do peso. Com relação às condições das vias, principalmente entre janeiro e março, por ser um período chuvoso, todos os anos as condições das vias pioram.

Um dos fatores que chamaram a atenção foi a troca da pneumática utilizada para fazer o ajuste dos parafusos, antes do uso do torquímetro. A ferramenta foi comprada em dezembro de 2023, período que antecede o aumento significativo das ordens de manutenção corretivas na área de borracharia e os eventos de soltura de rodas.

Posteriormente foram realizadas junto com a equipe multidisciplinar duas metodologias para tratamento de falhas utilizadas na MCC: o Diagrama de Ishikawa e o Diagrama dos Porquês.

4.3.1 Diagrama de Ishikawa

Primeiramente foi realizado o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama da espinha de peixe ou Diagrama de causa e efeito, onde foi possível ter uma visão mais macro das possíveis causas que levaram à soltura das rodas dos caminhões. A Figura 18 mostra o diagrama levantado pela equipe.

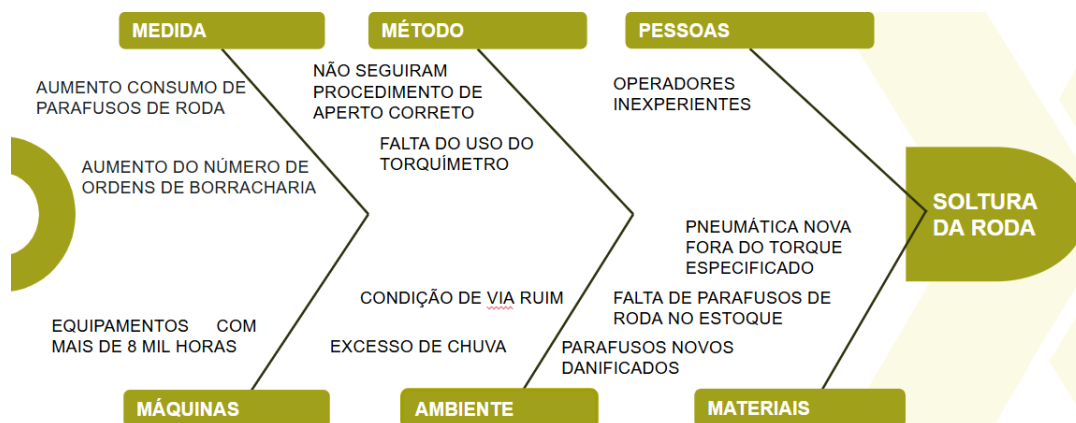


Figura 18: Diagrama de Ishikawa: Soltura de roda

Fonte: Pesquisa direta (2025)

No diagrama realizado pela equipe multidisciplinar, as possíveis causas que contribuíram formam a espinha do peixe e o efeito, que é a soltura da roda, fica na ponta, representando a cabeça do peixe. Dessa forma, as causas levantadas para cada grupo foram:

- **Medida:** foi o aumento do número de ordens de borracharia e consequentemente indisponibilidade do equipamento por problemas de borracharia, que incluem furos de pneu, necessidade de troca de pneu por fim de vida útil, parafusos frouxos e soltura de rodas e aumento do consumo de parafusos de rodas novos;
- **Máquinas:** foi o fato dos equipamentos já estarem com um horímetro relativamente alto, por estarem com mais de 8 mil horas;
- **Ambiente:** foi o excesso de chuva no período das ocorrências e as condições de vias ruins, em consequência das chuvas e da manutenção ineficiente das vias no período;
- **Metodo:** foi a operação não ter cuidado com o uso do caminhão em condições de via ruins, gerando excesso de impacto e vibrações nas rodas; a equipe de manutenção não seguir o procedimento de aperto de roda corretamente, que inclui o uso da pneumática apenas para posicionar os parafusos e o aperto deve ser feito com o torquímetro; sendo a falta de uso do toquimetro também uma possível causa;
- **Pessoas:** foi a falta de instrução tanto por parte da equipe de motoristas, utilizando o veículo de forma indevida, quanto a falta de instrução por parte da

equipe de manutenção, não seguindo o procedimento de aperto de forma correta;

- **Materiais:** foi levantada 3 possíveis causas, a primeira foi a falta de parafusos novos no estoque entre dezembro e janeiro, gerando a reutilização dos parafusos, o que não pode ser feito de acordo com o procedimento; a segunda foi de que os parafusos novos estariam vindo com um defeito de fabricação, por isso estariam fraturando; e a terceira foi de que a pneumática que a equipe estava usando era nova e poderia ter um torque excessivo.

A partir do diagrama já foram definidas algumas ações que seriam necessária para aprofundar o estudo, como: verificar as especificações da pneumática nova e fazer um comparativo com a antiga; e fazer uma análise dos parafusos novos, mas antes disso foi visto a necessidade de utilizar mais uma metodologia para identificar as possíveis causas, tornando a análise mais criteriosa, para isso foi realizado o Métodos dos Porquês.

4.3.2 Método dos Porquês

Com a metodologia dos Porquês, foi possível ter uma visão menos macro das possíveis causas e tratá-las de forma mais objetiva e pontual. Com isso, foram levantadas 4 hipóteses principais.

A primeira hipótese é de que a causa raiz poderia ser a reutilização dos parafusos de roda. No procedimento de manutenção, os parafusos de roda não podem ser reutilizados, pois com o tempo de uso eles podem sofrer danos como empenamento, estiramento e deformação devido ao calor, além de pressão e vibrações contínuas, mesmo sem sinais visíveis. A Figura 19 mostra a primeira hipótese do Diagrama dos Porquês.

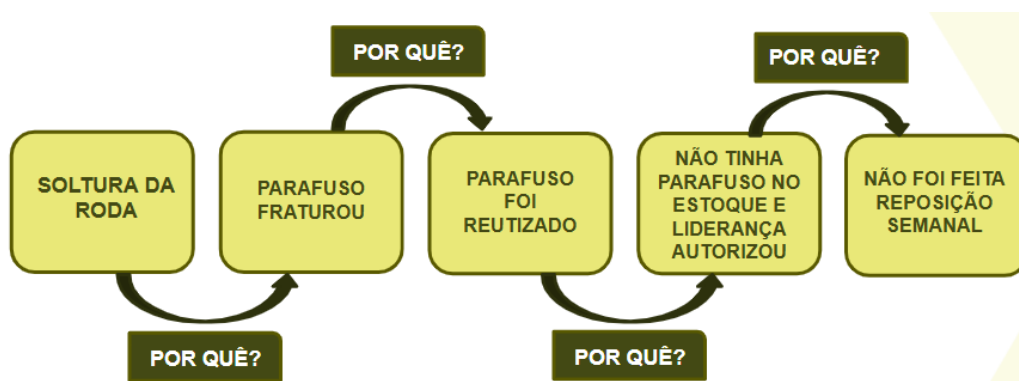


Figura 19: Diagrama dos Porquês – Estoque
Fonte: Pesquisa direta (2025)

A Figura 19 mostra que a reutilização de parafusos aconteceu por uma falha de processo da equipe de almoxarifados, que, em algumas semanas não realizou a reposição semanal de estoque em dezembro e o almoxarifado ficou sem parafusos de roda por alguns dias. Nesse caso, o correto seria deixar o equipamento parado aguardando a chegada dos parafusos, mas, devido à baixa disponibilidade de caminhões no período, a liderança autorizou algumas vezes a reutilização de parafusos de roda, descumprindo assim o procedimento, que poderia ter causado a soltura das rodas.

A Figura 20 mostra a segunda hipótese do Diagrama dos Porquês evidenciando a falha no procedimento de manutenção.

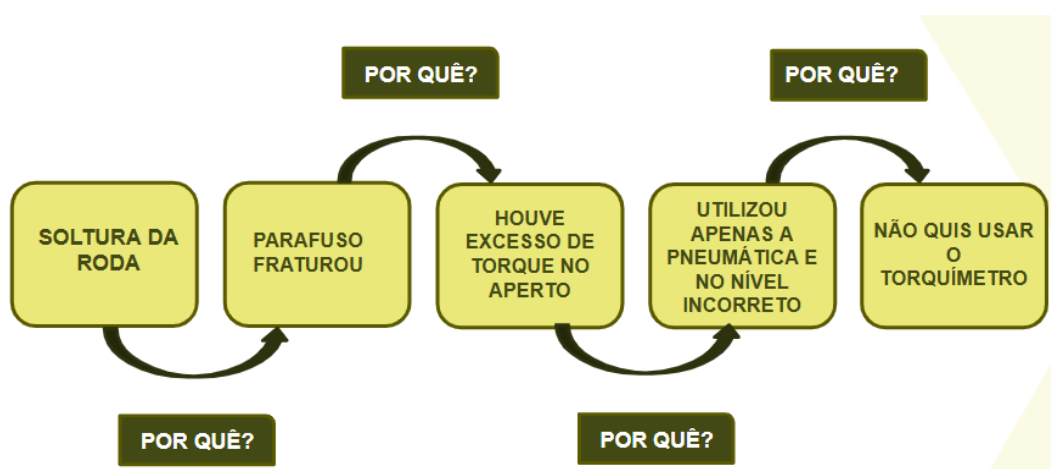


Figura 20: Diagrama dos Porquês – Procedimento
Fonte: Pesquisa direta (2025)

A segunda hipótese, evidenciada na figura 20, seria no processo de manutenção, onde o correto é a utilização da Pneumática apenas no primeiro estágio, para posicionar o parafuso, e posteriormente utilizar o torquímetro, porém com as câmeras foi evidenciado que algumas vezes a equipe tem utilizado apenas a pneumática, mesmo tendo o torquímetro disponível, provavelmente devido a rapidez do processo utilizando apenas a pneumática.

A Figura 21 mostra a terceira hipótese do Diagrama dos Porquês evidenciando o possível torque acima do especificado.

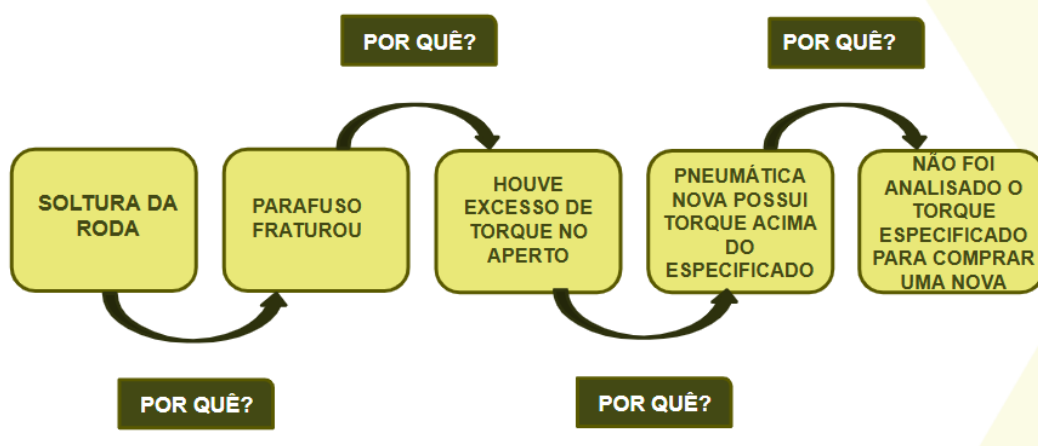


Figura 21: Diagrama dos Porquês – Pneumática
Fonte: Pesquisa direta (2025)

A terceira hipótese, evidenciada na figura 21, foi de que a pneumática que eles estavam utilizando agora era nova e parecia ser mais potente do que a anterior e que o torque dela poderia estar acima do que o especificado, para o aperto de roda, pelo fabricante.

Para investigar melhor a terceira hipótese, foram verificados os modelos das duas pneumáticas usadas na oficina, a antiga e a nova, e foram levantadas suas especificações do fabricante. A Tabela 2 faz um comparativo das especificações das pneumáticas antiga e nova.

Tabela 3: Comparativo Pneumática antiga e nova

Especificações	ANTIGA	NOVA
Marca	Puma	Sigma
Torque máximo (Kgf.m)	240	430,25
Pressão de trabalho (PSI)	90	90
Velocidade (rpm)	4000	3200

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A partir dos dados apresentados na Tabela 2, foi possível comprovar que, de fato, existe uma diferença significativa de torque da pneumática antiga para a nova, na qual a nova possui quase o dobro de torque do que a pneumática anterior, em seu último estágio. A Figura 22 mostra o registro fotográfico das duas pneumáticas, antiga e nova.

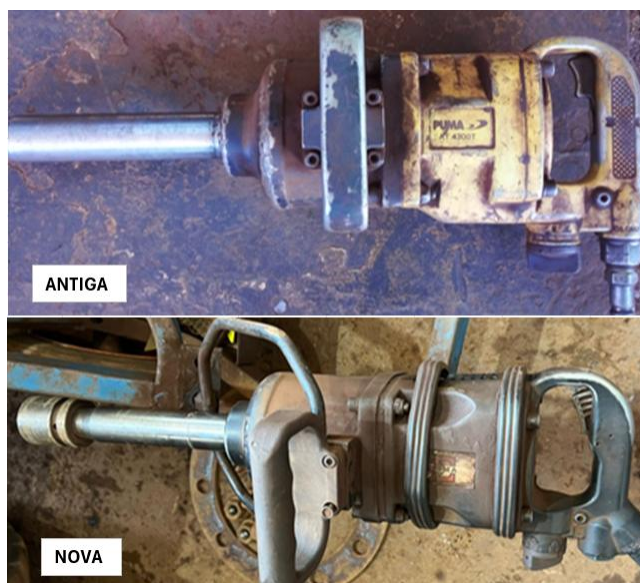


Figura 22: Pneumática antiga e nova
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A partir dos dados analisados e da inspeção física das ferramentas na realização do aperto, foi concluído que nitidamente o torque da ferramenta nova é muito superior ao da antiga. A Figura 23 faz um comparativo entre os torques das duas pneumáticas.



Figura 23: Comparativo de torques das pneumáticas
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A partir do comparativo apresentado na Figura 23, foi possível evidenciar que, de fato, existe uma diferença significativa de torque da pneumática antiga para a nova, na qual a nova possui quase o dobro de torque do que a pneumática anterior, em seu último estágio.

As duas pneumáticas tem 3 estágios, porém o fabricante não evidencia qual o torque máximo no primeiro e segundo estágio, o que se sabe é que o torque especificado pelo fabricante para o aperto das rodas é de $690N + ou - 35N$, que pela conversão dá em torno de 70kgf, por isso o procedimento da empresa é o uso da pneumática no primeiro estágio até posicionar o parafuso e posteriormente usar o torquímetro para garantir o torque especificado, sem sobrecarga. Após 2 voltas o caminhão tem que voltar para conferência do aperto e o borracheiro deve usar o torquímetro em todos parafusos para conferência.

Outra informação importante é que a pneumática nova foi comprada no dia 21 de dezembro de 2023, lembrando que, de acordo com os dados levantados, foi a partir de janeiro que houve um aumento significativo das ordens corretivas de borracharia e aumento do consumo de parafusos, o que fortalece essa hipótese.

A Figura 24 mostra a quarta hipótese do Diagrama dos Porquês evidenciando o possível torque acima do especificado.

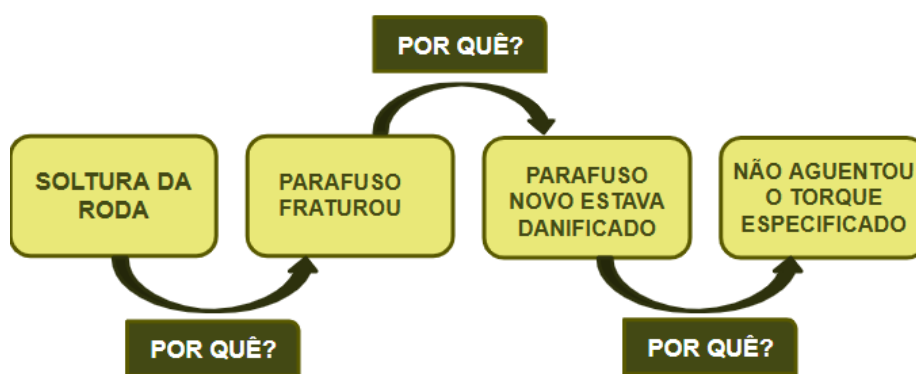


Figura 24: Diagrama dos Porquês - Parafuso novo
Fonte: Pesquisa direta (2025)

A quarta hipótese, evidenciada na figura 24, é de que o parafuso novo já poderia estar danificado ou sem tratamento térmico ou camada protetora adequada, por isso não estaria aguentando o torque aplicado com a pneumática e o torquímetro.

Para conseguir entender se de fato o parafuso que estava sendo utilizado tinha alguma falha de fabricação, foram realizadas primeiramente uma análise macroscópica e posteriormente uma análise microscópica e metalográfica com o apoio de um laboratório local, que será evidenciado seus resultados posteriormente.

4.4 Análise do parafuso

Para realizar uma análise dos parafusos, foram coletados inicialmente 12 parafusos, sendo 10 deles retirados de uma roda que se soltou, um parafuso de uma roda que não se soltou e um parafuso novo, retirado do almoxarifado.

Após uma análise visual, foram definidos 02 parafusos fraturados, 01 parafuso empenado e 01 parafuso novo, para retirada das amostras para a realização das análises. Para ajudar a entender a causa raiz da soltura de roda dos caminhões, foram realizadas três análises nos parafusos: análise macrográfica (MA), análise de microscopia eletrônica de varredura

(MEV) e análise metalográfica (MO), sendo as duas últimas realizadas em parceria com um laboratório.

A Figura 25 apresenta os locais onde foram realizadas as análises nos parafusos coletados.



Figura 25: Locais de retirada de amostras para análises
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Análise macrográfico (MA)

A análise macrográfica foi realizada na superfície da fratura e na região dos filetes de rosca com o auxílio de uma câmera de alta resolução para registro neste estudo.

Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As amostras da região da fratura, filete e amostras polidas foram analisadas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado ao espectrômetro de energia dispersiva de raios X (EDS).

Análise metalográfica (MO)

As amostras foram embutidas, lixadas (lixa de 50, 120, 240, 400, 600 e 1200 mm) e polidas com diamante em suspensão (3 e 1 μm), fazendo a lubrificação com álcool etílico. As

amostras para análises metalográficas por microscopia ótica foram realizadas na seção longitudinal (região de início da falha) e nas regiões dos filetes de rosca. A análise metalográfica foi realizada com e sem ataque químico. O reagente utilizado foi o nital 2%.

4.4.1 Análise Macrográfica

4.4.1.1 Parafuso 1

Durante a análise macroscópica da fratura, verificou-se que o parafuso rompeu de forma aparentemente plana e sem deformação plástica aparente. A Figura 26 mostra os detalhes da fratura do parafuso fraturado 1 e as trincas na raiz do filete de rosca.

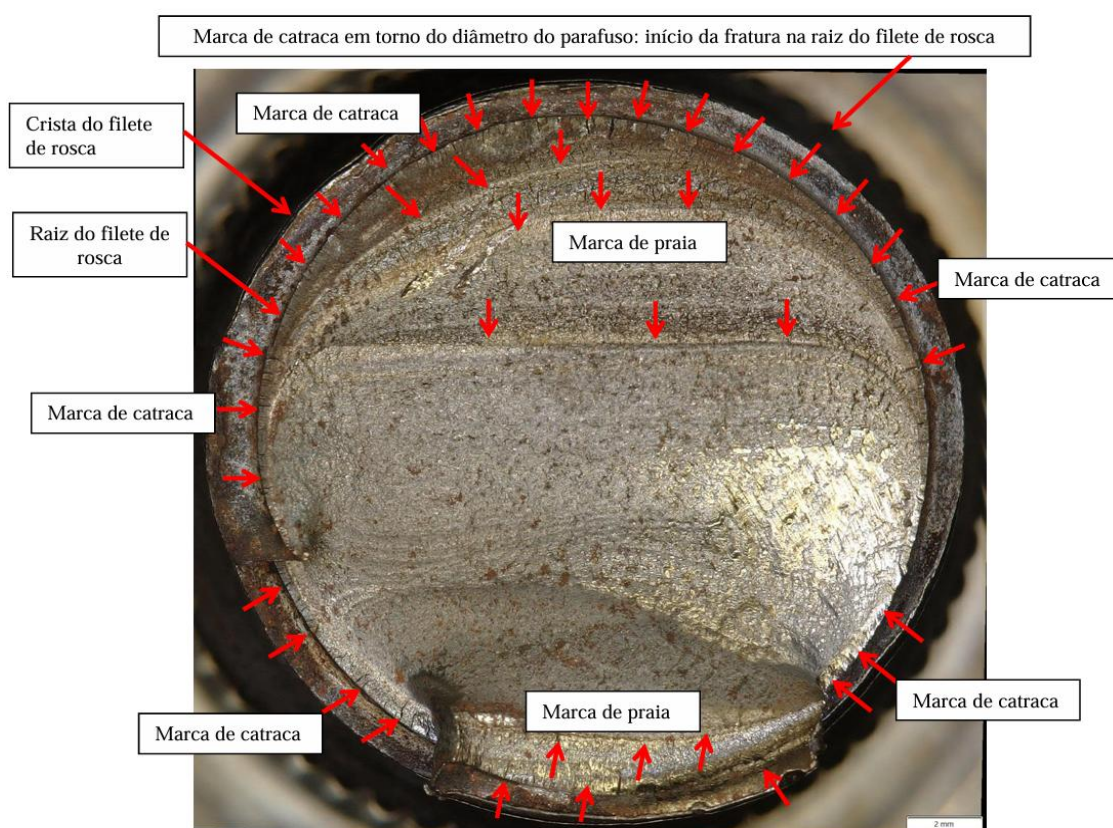


Figura 26: Superfície da fratura – parafuso fraturado 1
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Observaram-se claramente todos os estágios de uma propagação de trinca por mecanismos de fadiga mecânica que se resumem à iniciação, à propagação das trincas “marcas de praia” e à fratura final. Foi notado que as trincas iniciaram nas raízes dos filetes da rosca em planos ao redor da área útil do parafuso, formando desníveis chamados de Marcas de Catraca.

A Figura 27 mostra os detalhes da lateral do parafuso fraturado 1.



Figura 27: Superfície lateral – parafuso fraturado 1
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Foi notada a presença de trincas em vários pontos na raiz dos filetes de rosca e marcas de desgaste na crista dos filetes de rosca, conforme evidenciado na Figura 27.

4.4.1.2 Parafuso 2

Durante a análise macroscópica da fratura do parafuso 2, verificou-se que o parafuso rompeu de forma aparentemente plana e sem deformação plástica aparente. A Figura 28 mostra a superfície da fratura do parafuso fraturado 2.

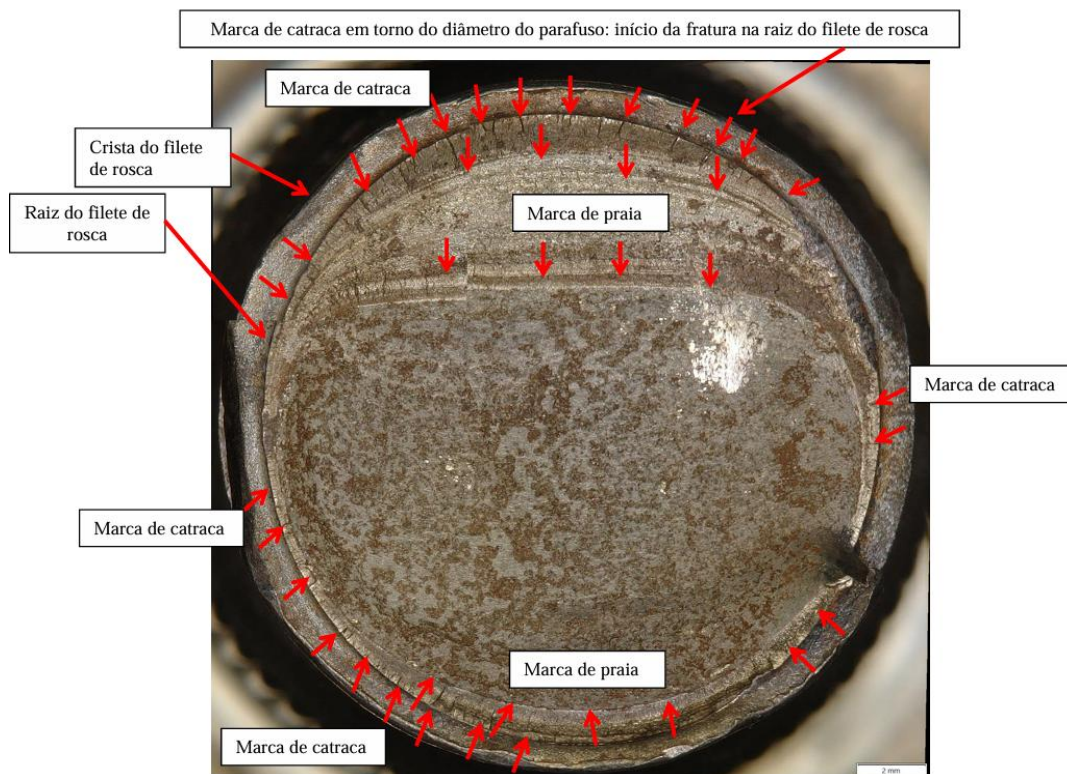


Figura 28: Superfície da fratura – Parafuso fraturado 2
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na Figura 28 é possível ver todos os estágios de uma propagação de trinca por mecanismos de fadiga mecânica resumidos em iniciação, propagação das trincas “marcas de praia” e fratura final. Foi notado que trincas foram formadas nas raízes dos filetes da rosca em planos ao redor da área útil do parafuso, formando desníveis chamados de Marcas de Catraca.

A Figura 29 mostra os detalhes da lateral do parafuso fraturado 1.



Figura 29: Superfície lateral da fratura – Parafuso fraturado 2
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Foi notada a presença de trincas em vários pontos na raiz dos filetes de rosca e marcas de desgaste na crista dos filetes de rosca, conforme evidenciado na Figura 27.

4.4.1.3 Parafuso 3

O parafuso 3 é o parafuso que foi empenado com a soldura da roda. A Figura 30 mostra os detalhes da lateral do parafuso 3.

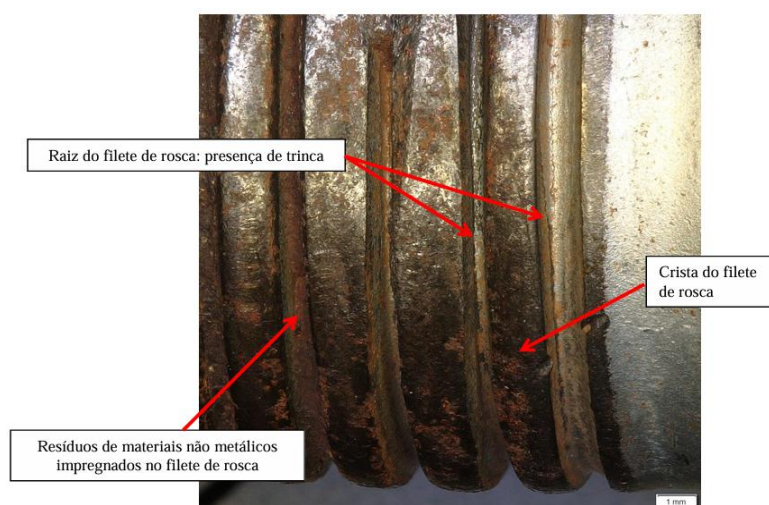


Figura 30: Superfície lateral - Parafuso empenado 3
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Foram evidenciados trincas na raiz do filete de rosca e resíduos de materiais não metálicos impregnados no filete de rosca, como foi evidenciado na Figura 30.

4.4.1.4 Parafuso novo 4

O parafuso 4 é o parafuso novo, que nunca foi utilizado. A Figura 31 mostra os detalhes da lateral do parafuso 4.

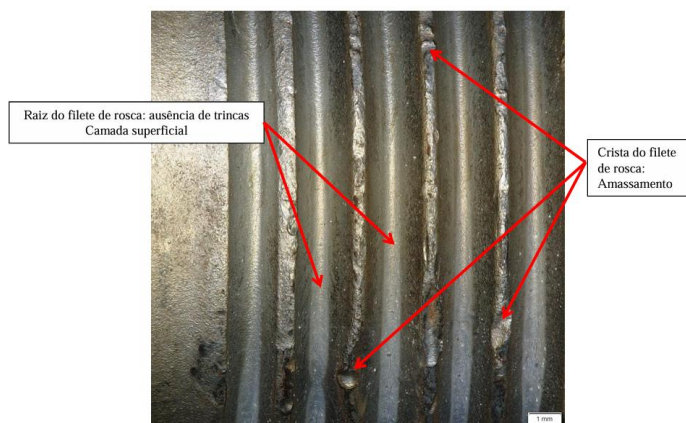


Figura 31: Superfície lateral - Parafuso novo 4
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Aparentemente, o parafuso novo não apresentou trincas na raiz do filete de rosca, mas foram vistos diversos pontos de amassamentos plásticos na crista do filete.

4.4.2 Análise com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise por microscopia eletrônica de varredura foi realizada na superfície da fratura e na região da raiz do filete da rosca.

4.4.2.1 Parafuso 1

A Figura 32 mostra as superfícies da fratura do parafuso 1 analisadas no MEV.

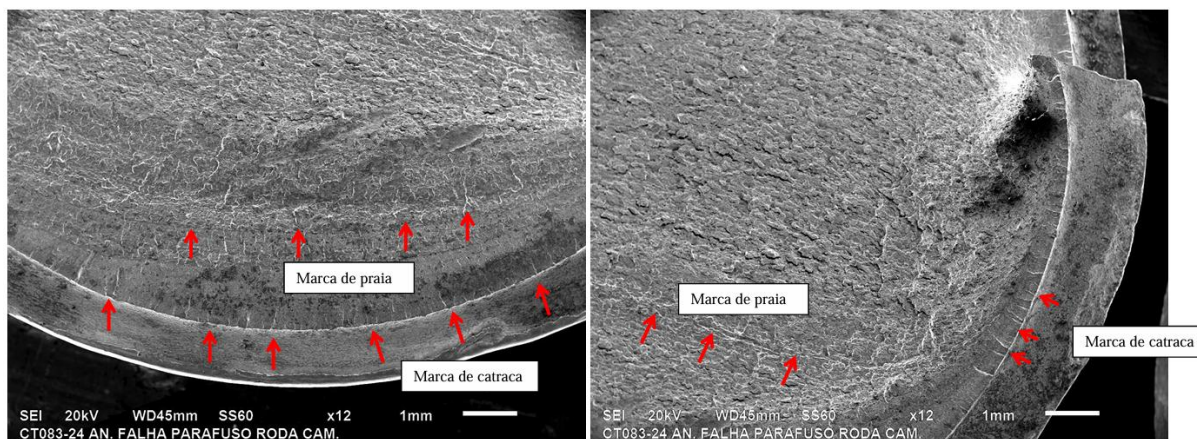


Figura 32: Superfície da fratura - parafuso fraturado 1
Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

Foi assim evidenciada a fratura por fadiga mecânica devido à presença de marca de catraca no início da fratura e marcas de praia. Junto às regiões das marcas de catraca foram vistas regiões com aspecto de corrosão nas duas amostras fraturadas. Junto às regiões das marcas de catraca foram vistas regiões com aspecto de corrosão nas duas amostras fraturadas.

A Figura 33 mostra a superfície da fratura com aspecto de corrosão do parafuso fraturado 1.

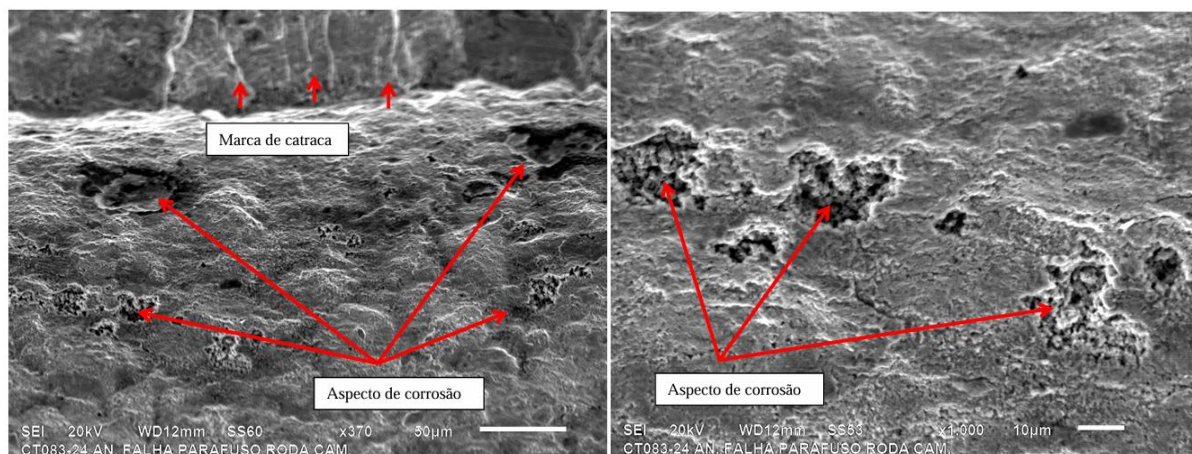


Figura 33: Superfície da fratura com aspecto de corrosão – parafuso fraturado 1

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

Regiões com aspecto de corrosão foram vistas na raiz do filete, sendo próximas da região de início de fratura e foi possível ver também marcas de catraca da superfície lateral, como foi evidenciado na Figura 33.

A Figura 34 mostra os pontos da superfície do parafuso fraturado 1 onde foi feita a microanálise química.

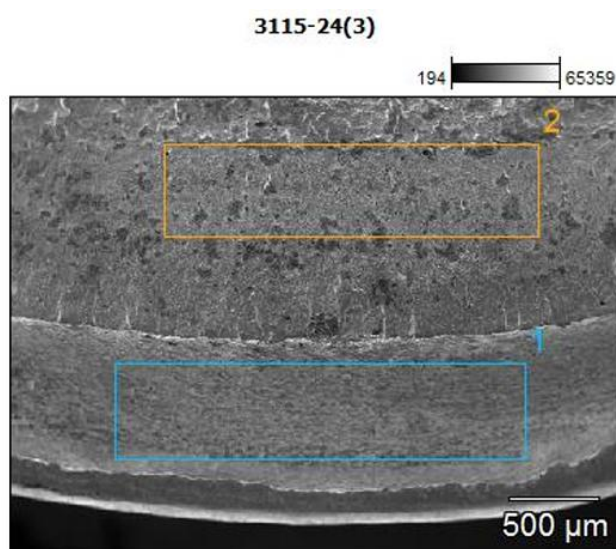


Figura 34: Superfície da fratura – parafuso fraturado 1 - 37X

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A figura 34 evidencia os pontos onde foram feitas as microanálises químicas, no caso, 2 diferentes pontos. A Tabela 4 mostra o resultado da microanálise química da região da Figura 34.

Tabela 4: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso fraturado 1

	<i>O</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>
<i>3115-24(3)_pt1</i>	1.85			0.26	0.95	0.97	95.96
<i>3115-24(3)_pt2</i>	1.29	0.07	0.13	0.38	0.99	0.98	96.15

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A Tabela 4 mostra a microanálise química por MEV/EDS nas regiões da raiz do filete e da superfície da fratura, onde ambas apresentaram certa semelhança; onde não foram evidenciados valores consideráveis dos elementos Zn e Al que fazem parte de camada superficial contra a corrosão. Na tabela 4 foi possível notar também a presença de oxigênio, evidenciando a possível presença de óxidos.

A Figura 35 mostra regiões com aspecto de corrosão que também foram vistas na superfície da fratura próximas das marcas de catraca na região da raiz do filete do parafuso fraturado 1.

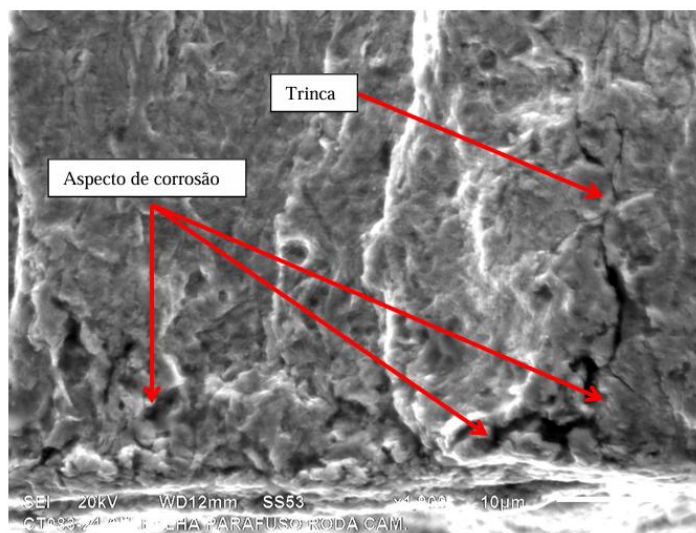


Figura 35: Superfície da fratura – parafuso fraturado 1

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A Figura 35 evidencia regiões com aspecto de corrosão que também foram vistas na superfície da fratura próximas das marcas de catraca na região da raiz do filete do parafuso fraturado 1. A Figura 36 mostra os pontos da superfície do parafuso fraturado 1 onde foi feita a microanálise química dessa região.

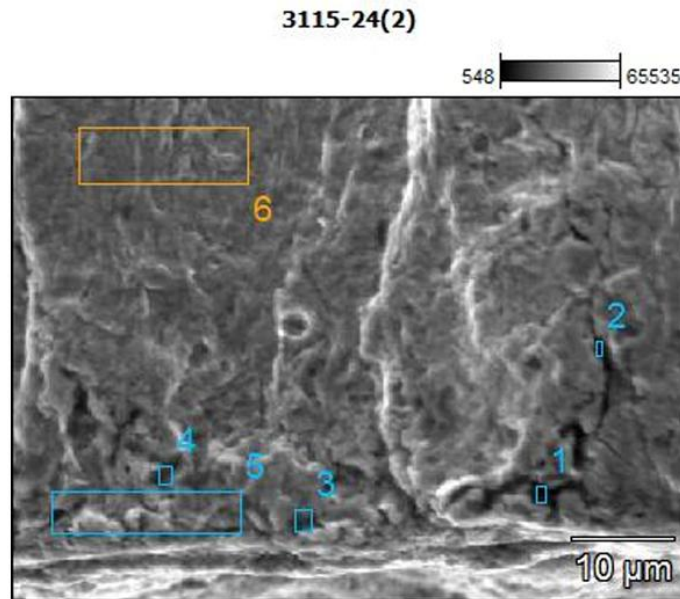


Figura 36: Superfície da fratura – parafuso fraturado 1 – 1899X
Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A figura 36 evidencia os pontos onde foram feitas as microanálises químicas, no caso, 6 diferentes pontos.

A Tabela 5 mostra o resultado da microanálise química da região da Figura 36.

Tabela 5: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso fraturado 1

	C	N	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Zn	Mo
3115-24(2)_pt1	5.73	3.35	5.06		0.85	1.11		0.21	0.28	0.50	0.46	82.11		0.36
3115-24(2)_pt2	1.28		2.06			0.37				0.81	1.03	94.45		
3115-24(2)_pt3	1.70		3.97		0.47	1.22		0.19		0.82	0.64	90.39	0.61	
3115-24(2)_pt4	0.00		3.81	1.26	0.22	1.39	0.09	0.16		0.81	0.94	91.33		
3115-24(2)_pt5	0.00		2.35	0.30	0.25	0.54				0.74	0.80	95.02		
3115-24(2)_pt6	0.00				0.18	0.29				1.03	0.87	97.62		

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A microanálise química por MEV/EDS na região com aspecto de corrosão, evidenciada na Figura 36, mostrou a presença de oxigênio nos pontos 1 a 5, evidenciando a possível presença de óxidos.

A Figura 37 evidencia a maior característica microscópica da propagação da trinca por fadiga, que é a presença de estrias.

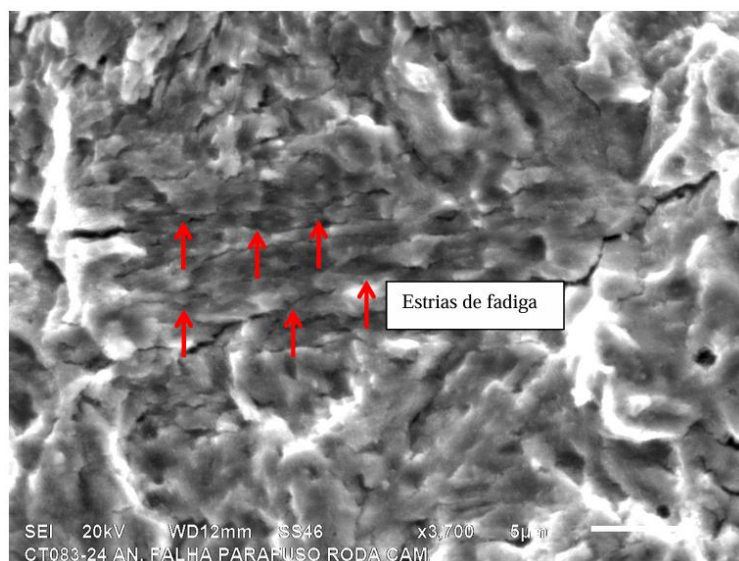


Figura 37: Superfície da fratura—parafuso fraturado 1

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

As estrias são geradas quando o componente recebe picos de tensão, provocando o avanço da trinca. Esse progresso da trinca deixa uma marca na superfície de fratura na forma de um pequeno degrau.

A Figura 38 mostra a região de fratura monotônica (apenas um carregamento) na parte final da fratura, com a presença de dimples, o que demonstra um tipo de fratura dúctil.

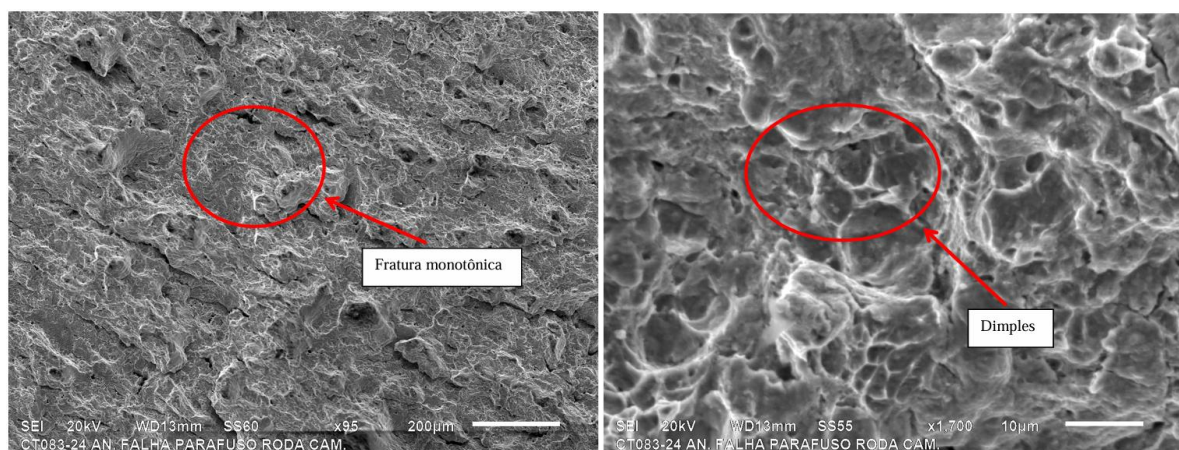


Figura 38: Meio da fratura - parafuso fraturado 1

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A Figura 38 mostra a região de fratura monotônica (apenas um carregamento) na parte final da fratura, com a presença de dimples, o que demonstra um tipo de fratura dúctil.

A Figura 39 mostra regiões da raiz do filete com trincas e superfície com aspecto de corrosão.

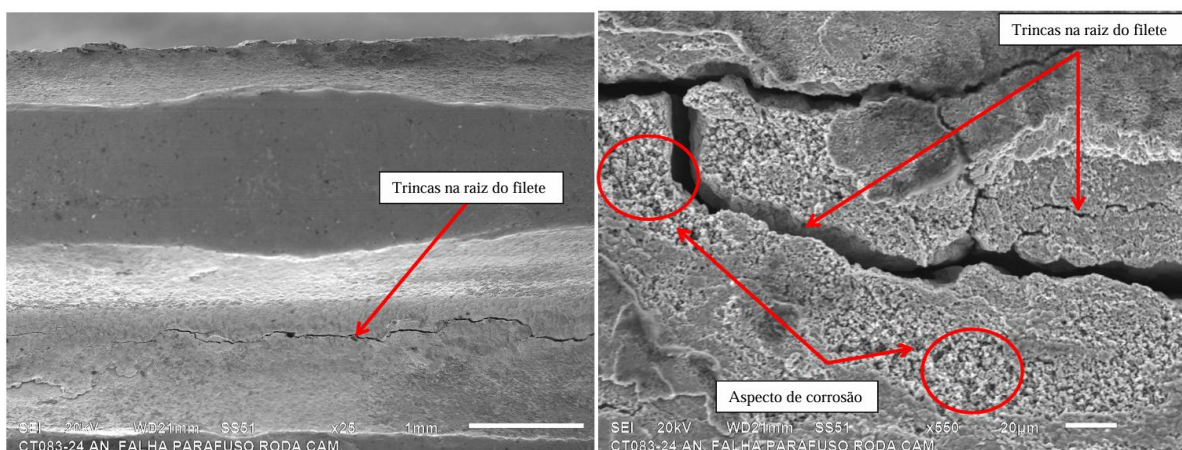


Figura 39: Superfície lateral da fratura (região dos filetes) – parafuso fraturado 1

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A Figura 38 mostra a região de fratura monotônica (apenas um carregamento) na parte final da fratura, com a presença de dimples, o que demonstra um tipo de fratura dúctil.

4.4.2.2 Parafuso 2

A amostra do parafuso fraturado 2 mostra também a presença de marca de catraca nas regiões de início da fratura e marcas de praia. A Figura 40 mostra as superfícies da fratura do parafuso 2 com marcas de catraca.

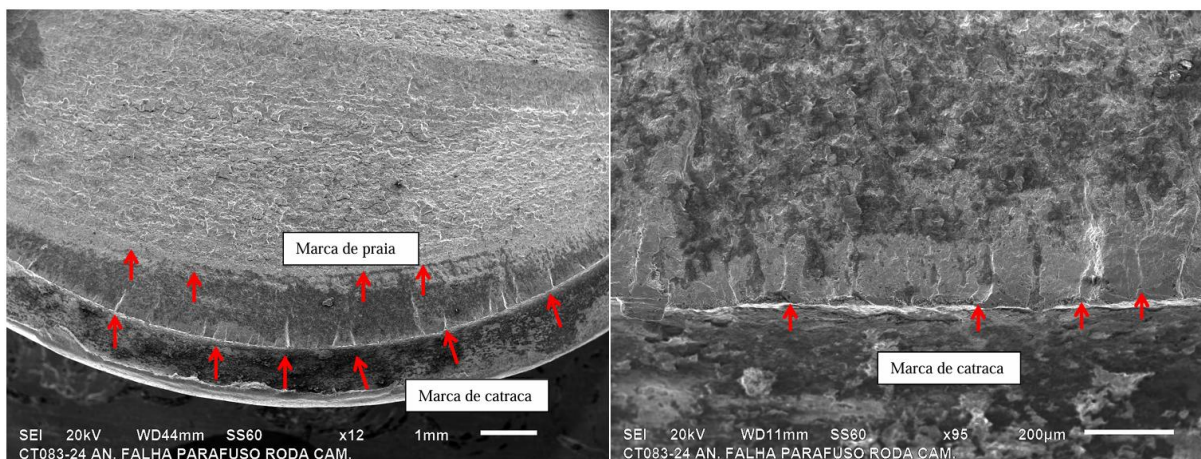


Figura 40: Superfície da fratura – parafuso fraturado 2

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

Foi assim evidenciada a fratura por fadiga mecânica devido à presença de marca de catraca no início da fratura e marcas de praia. Junto às regiões das marcas de catraca foram vistas regiões com aspecto de corrosão nas duas amostras fraturadas. Junto às regiões das marcas de catraca foram vistas regiões com aspecto de corrosão nas duas amostras fraturadas

A Figura 41 mostra que regiões com aspecto de corrosão foram observadas na raiz do filete.

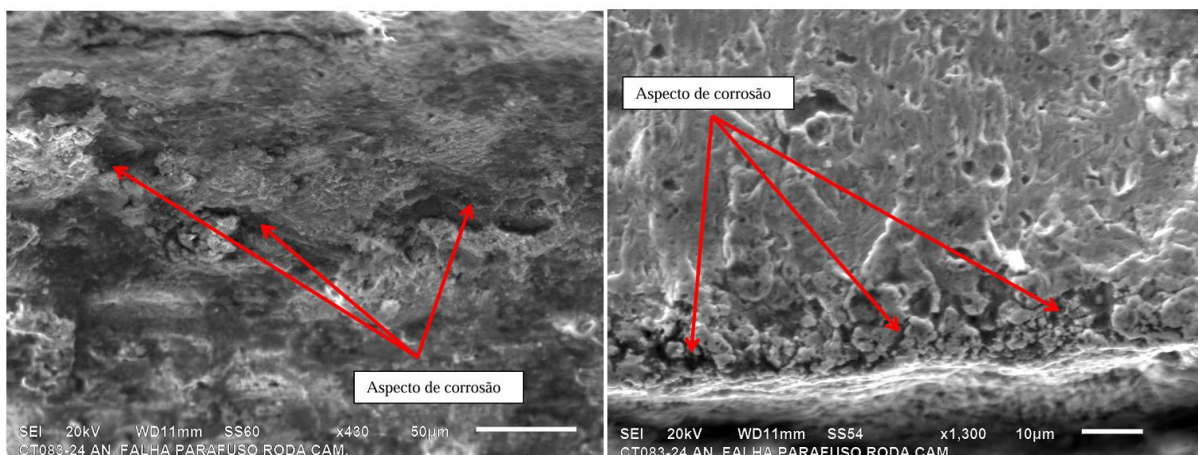


Figura 41: Superfície da fratura – parafuso fraturado 2
 Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A microanálise química por MEV/EDS nas regiões da raiz do filete e da superfície da fratura apresentou certa semelhança; não foram evidenciados valores consideráveis dos elementos Zn e Al que fazem parte de camada superficial contra a corrosão. Ressalta-se que o fabricante não repassou informação sobre especificação de camada superficial. A Figura 42 mostra os pontos da superfície do parafuso fraturado 2 onde foi feita a microanálise química.

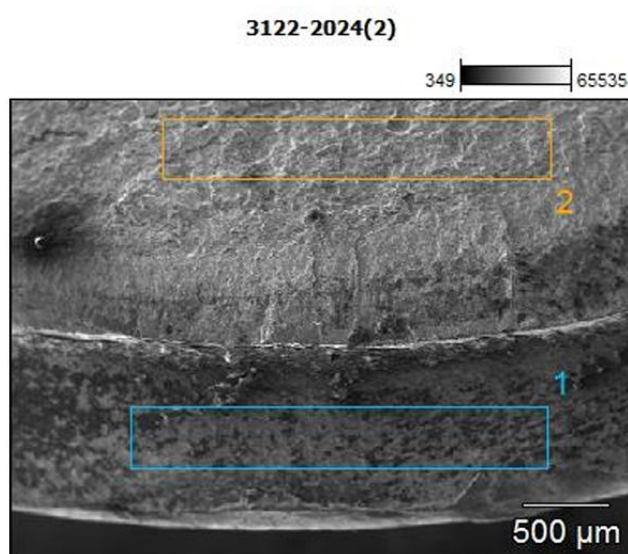


Figura 42: Superfície da fratura – parafuso fraturado 2 – 35x
 Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A figura 42 evidencia os pontos onde foram feitas as microanálises químicas, no caso, 2 diferentes pontos. A Tabela 6 representa a microanálise química feita na região evidenciada pela Figura 37 no parafuso fraturado 2.

Tabela 6: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso fraturado 2

	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Zn</i>
<i>3122-2024(2)_pt1</i>	11.59	1.49	3.05	0.21	0.54	1.91	0.98	78.72	1.52
<i>3122-2024(2)_pt2</i>			0.28			1.02	0.97	97.72	

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A microanálise química por MEV/EDS na região com aspecto de corrosão mostrou a maior presença de oxigênio no ponto 1 da Figura 37, evidenciando a possível presença de óxidos.

A Figura 43 mostra os pontos da superfície do parafuso fraturado 2 onde foi feita a microanálise química.

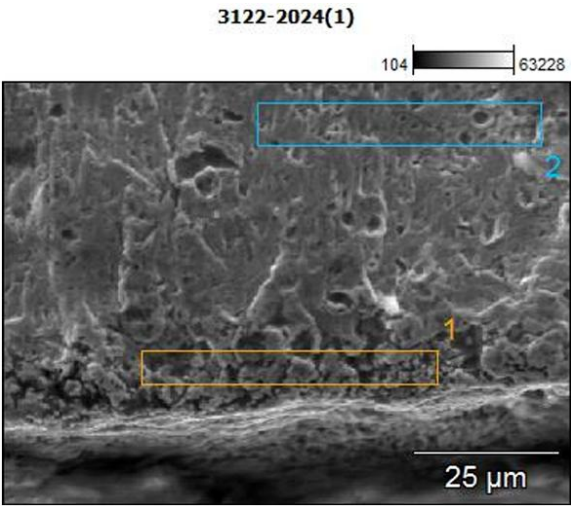


Figura 43: Superfície da fratura – parafuso fraturado 2 – 1300x
Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A figura 43 evidencia os pontos onde foram feitas as microanálises químicas, no caso, 2 diferentes pontos. A Tabela 7 representa a microanálise química feita na região evidenciada pela Figura 55 no parafuso fraturado 2.

Tabela 7: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso fraturado 2

	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Na</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>Ca</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>
<i>3122-2024(1)_pt1</i>	5.83	2.93	0.22	0.32	0.66	0.12	0.13	1.19	0.86	87.74
<i>3122-2024(1)_pt2</i>	0.00	1.74		0.23	0.86			1.06	0.91	95.19

Fonte: Adaptado SENAI/LAMAT ITAÚNA 3138(2024)

A Figura 44 evidencia a maior característica microscópica da propagação da trinca por fadiga, que é a presença de estrias.

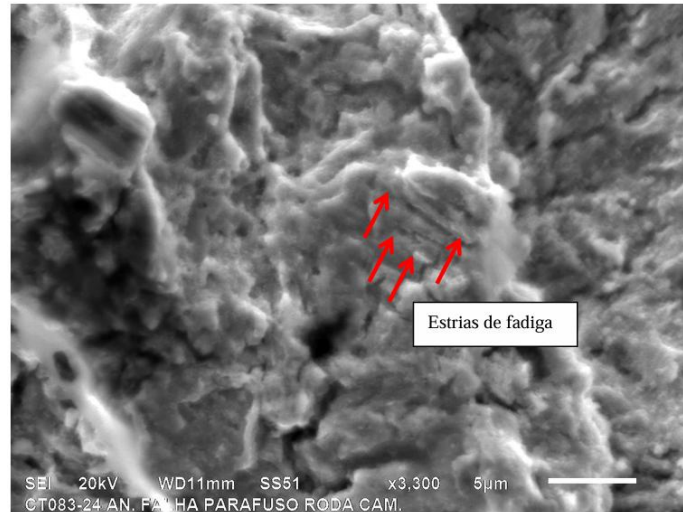


Figura 44: Superfície da fratura – parafuso fraturado 2
 Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

As estrias são geradas quando o componente recebe picos de tensão, provocando o avanço da trinca. Esse progresso da trinca deixa uma marca na superfície de fratura na forma de um pequeno degrau.

A Figura 45 mostra a região do meio da fratura.

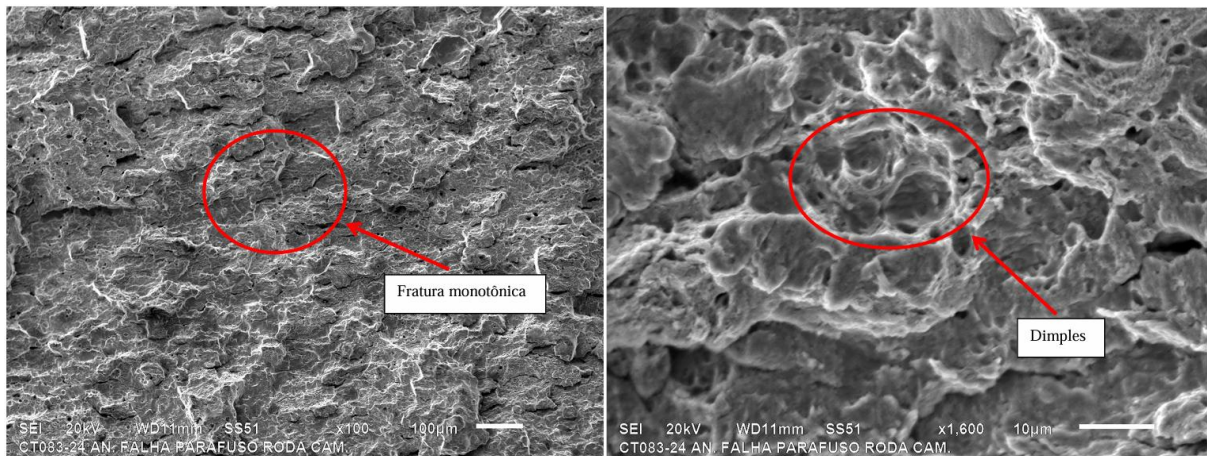


Figura 45: Meio da fratura – parafuso fraturado 2
 Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A Figura 45 mostra a região de fratura monotônica, que é aquela em que ocorre instantaneamente após apenas um carregamento, na parte final da fratura, com a presença de dimples, o que demonstra um tipo de fratura dúctil no parafuso 2.

A Figura 46 mostra a superfície lateral da fratura.

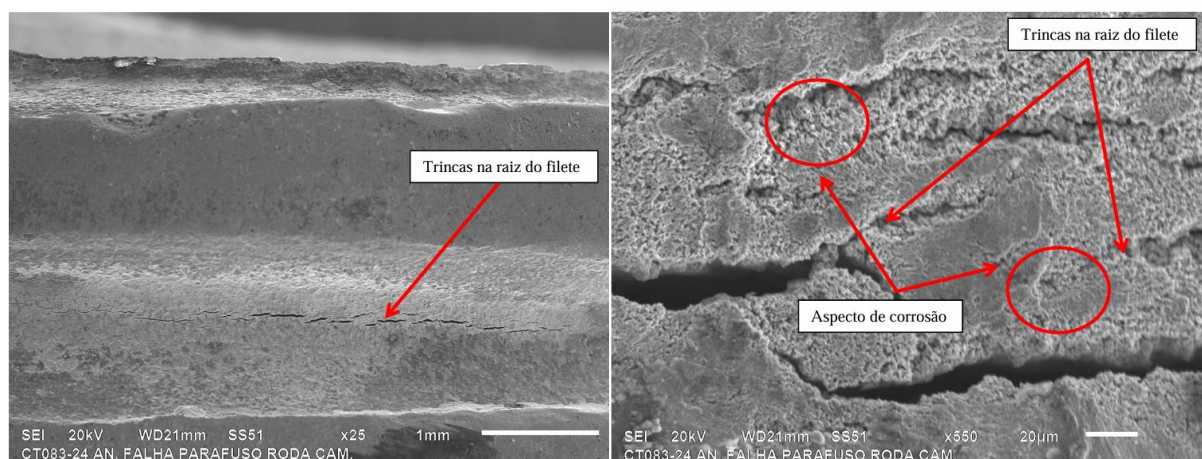


Figura 46: Superfície lateral da fratura (região dos filetes) – parafuso fraturado 2
Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

Vários pontos de corrosão foram evidenciados na raiz do filete e também foram evidenciadas trincas contínuas na superfície lateral da fratura.

A Figura 47 mostra mais um ponto da superfície lateral da raiz do filete, na região do início da fratura do parafuso fraturado 2.

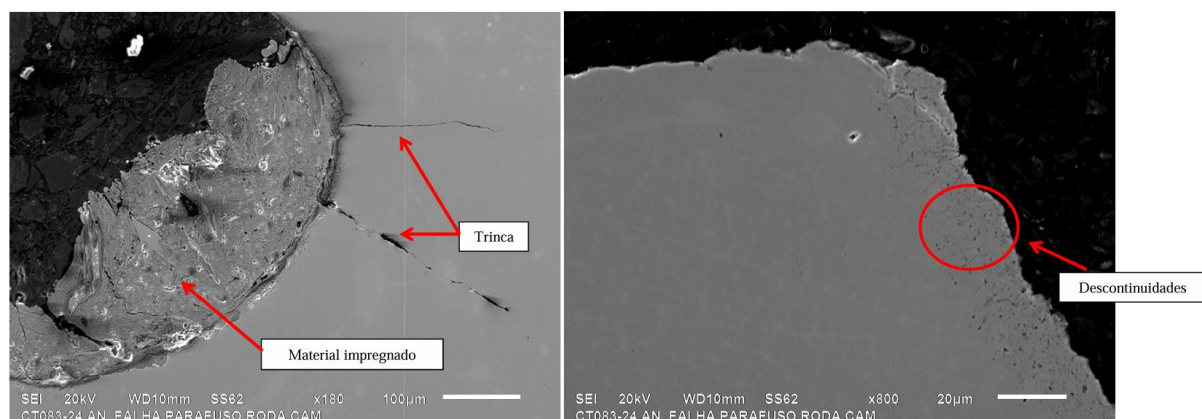


Figura 47: Superfície lateral da raiz do filete (início da fratura) – parafuso fraturado 2
Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

Uma faixa com descontinuidades foi observada na superfície da amostra, na região de início da fratura, que possivelmente são em consequência da matéria impregnada e das trincas evidenciadas também na Figura 47.

4.4.2.3 Parafuso 3

O parafuso 3 é o parafuso empenado. A Figura 48 mostra regiões da raiz do filete analisadas.

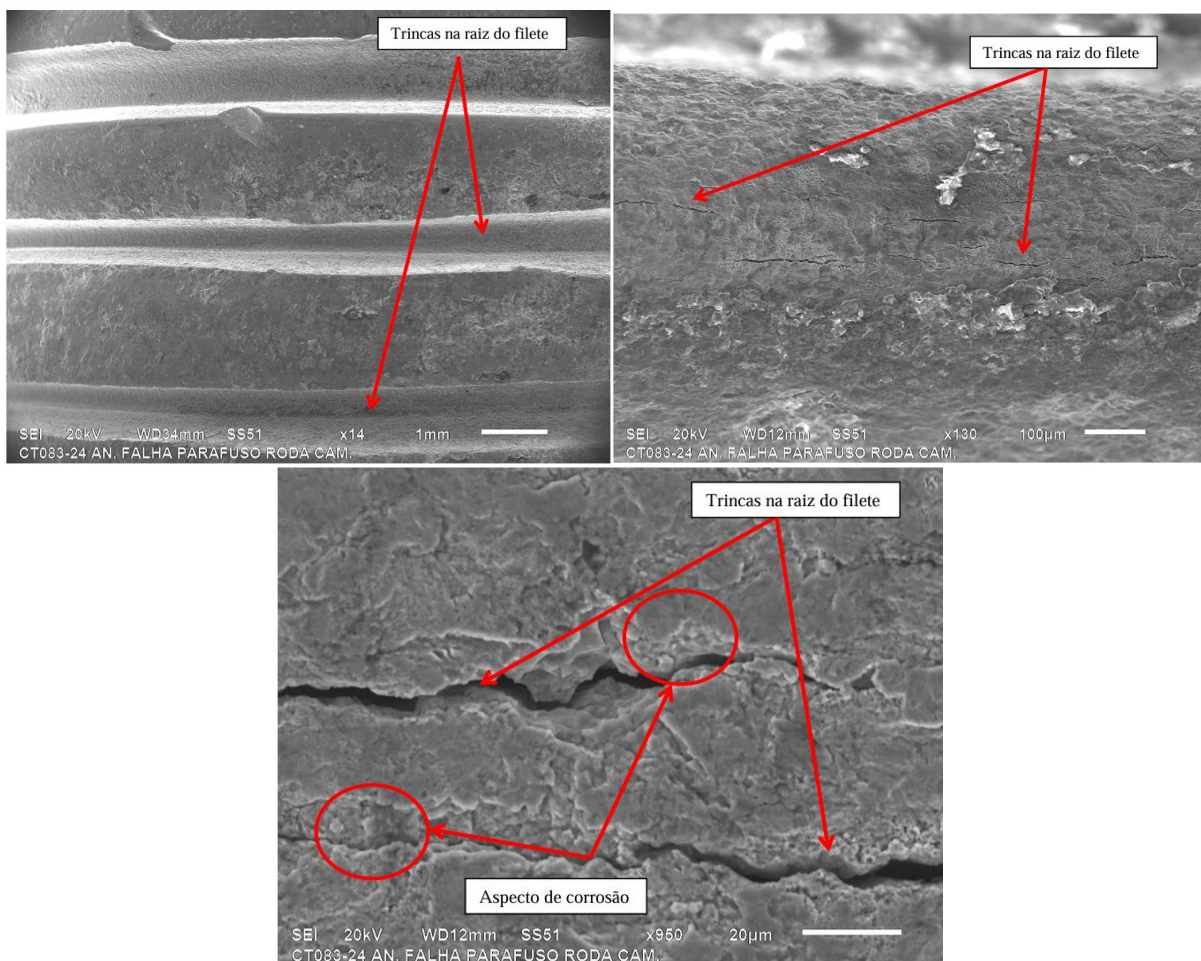


Figura 48: Superfície da raiz do filete – Parafuso empenado 3
 Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

Foi possível observar vários pontos com trincas na raiz do filete e superfície com aspecto de corrosão em vários pontos no parafuso empenado 3, o que é justificável devido ao empeno que o mesmo sofreu.

4.4.2.4 Parafuso 4

A análise do parafuso 4 é a mais importante para este estudo, visto que uma das hipóteses apresentadas como causa raiz para a soltura de rodas seria sua falha na fabricação. A Figura 49 mostra a superfície da raiz do filete do parafuso novo 4.

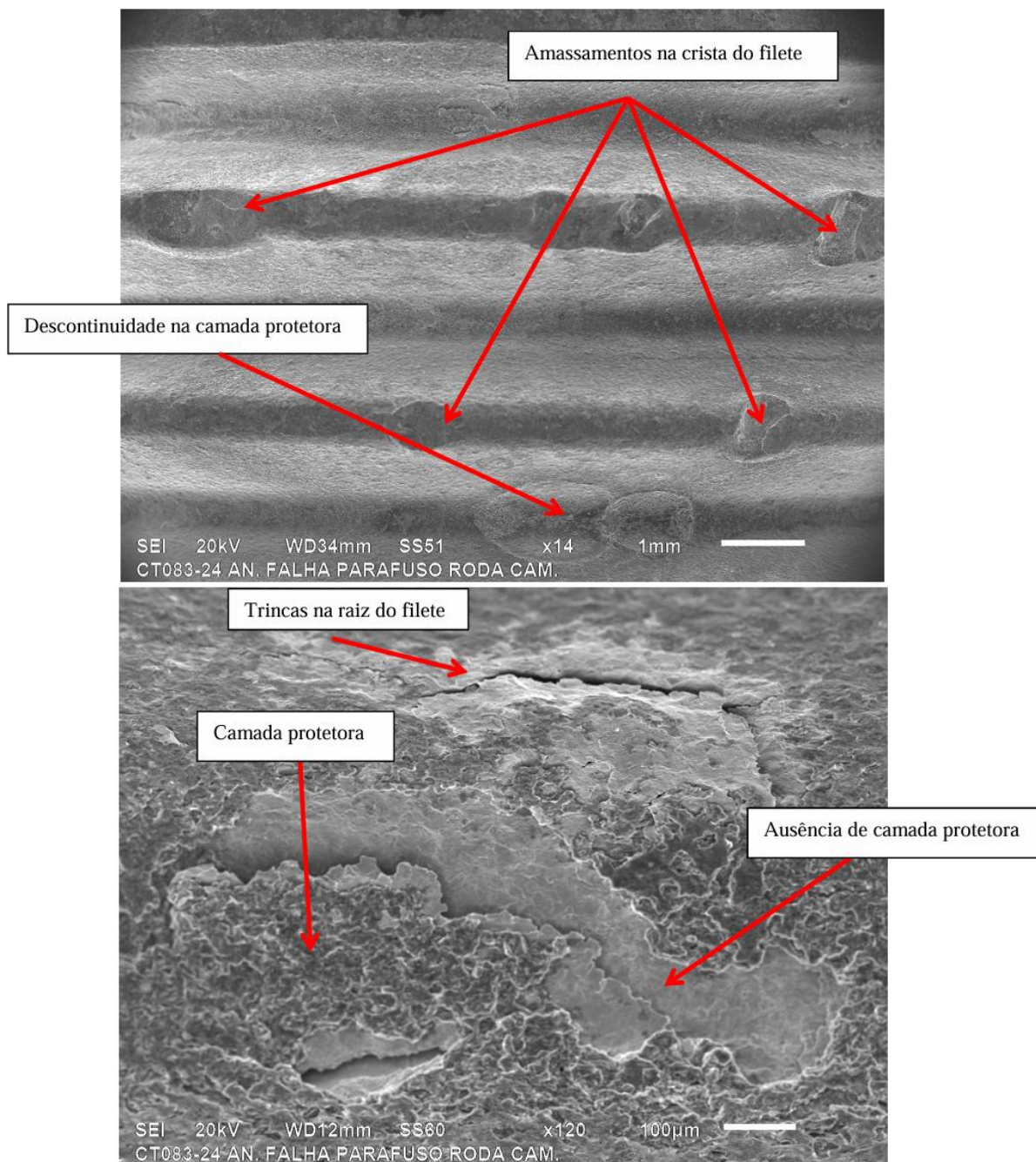


Figura 49: Superfície da raiz do filete – parafuso novo 4
 Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

Foi possível observar amassamentos na região da crista do filete de rosca, regiões com descontinuidades, como a ausência de camada superficial contra corrosão e trincas na raiz do filete, como foram evidenciados na Figura 49.

A Figura 50 mostra os pontos da superfície do parafuso novo 4 onde foi feita a microanálise química.

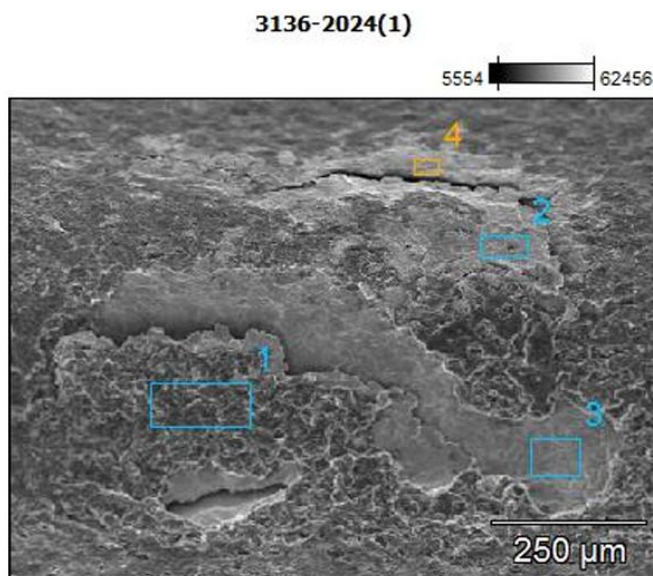


Figura 50: Superfície da raiz do filete – parafuso novo 4 – 120x
Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A figura 50 evidencia os pontos onde foram feitas as microanálises químicas, no caso, 4 diferentes pontos, onde o ponto 3 evidencia a região com ausência de camada superficial protetora. A Tabela 8 representa a microanálise química feita na região evidenciada pela Figura 48 no parafuso 4.

Tabela 8: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso novo 4

	C	O	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Zn	Mo
3136-2024(1)_pt1	7.70	18.54	4.95	9.35		0.12	3.16			4.12		49.14	2.92
3136-2024(1)_pt2	5.67	6.18	1.38	2.66	0.02	0.10	0.69	1.20	0.70	76.78		4.13	0.49
3136-2024(1)_pt3	0.00	2.82	0.50	0.80				1.25	0.83	92.27		1.53	
3136-2024(1)_pt4	0.00	5.92	1.21	2.15			0.36	1.74	0.60	83.58	0.94	3.50	

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A microanálise química por MEV/EDS na região da camada apresentou elementos como Zn e Al (ponto 1) típicos de camada superficial contra corrosão. Em regiões 2, 3 e 4 com ausência de camada apresentaram-se baixos valores de Zn e Al.

A Figura 51 mostra em detalhes a região com trincas na raiz do filete de rosca do parafuso novo 4.

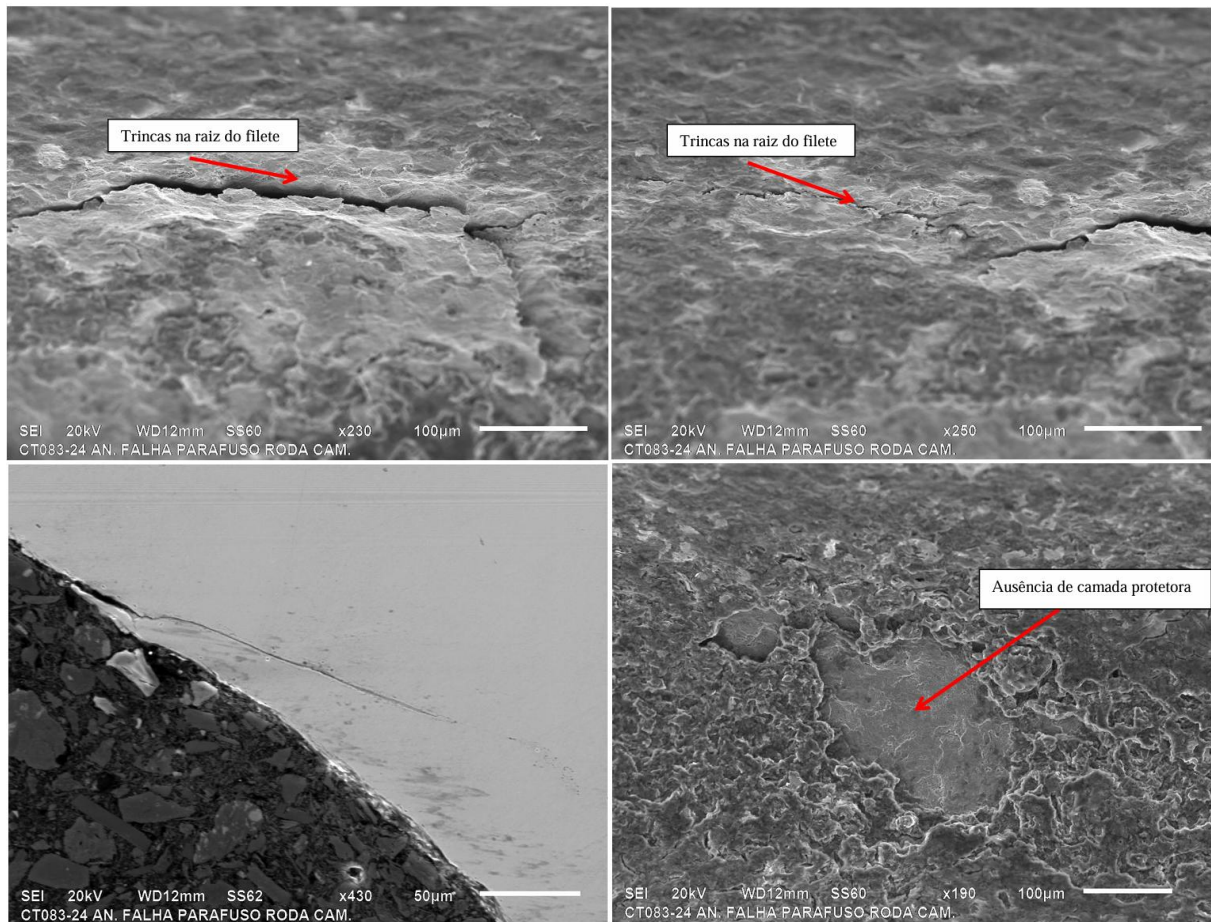


Figura 51: Superfície lateral da raiz do filete – parafuso novo 4
 Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

Foram evidenciados vários pontos com trincas na lateral da raiz do filete de rosca do parafuso novo 4, além de ausência de camada superficial protetora contra corrosão. A Figura 52 mostra os pontos da superfície da raiz do filete do parafuso 4 onde foi feita a microanálise química.

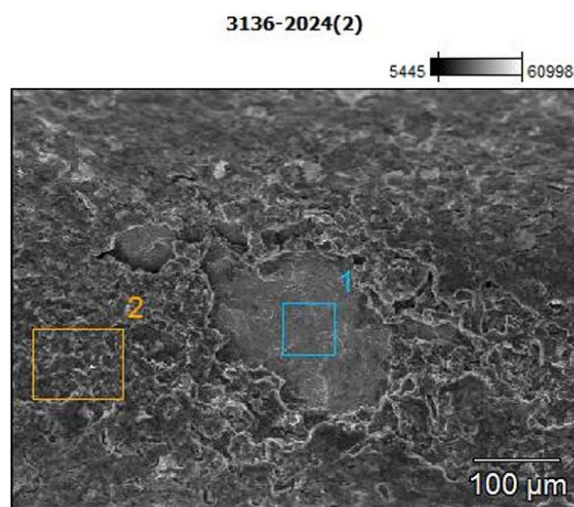


Figura 52: Superfície da raiz do filete – parafuso novo 4 – 120x
 Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A figura 52 evidencia os pontos onde foram feitas as microanálises químicas, no caso, 2 diferentes pontos, onde o ponto 1 possui visualmente ausência de camada protetora. A Tabela 11 representa a microanálise química feita na região evidenciada pela Figura 47.

Tabela 9: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso novo 4

	C	O	Al	Si	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Zn	Mo
3136-2024(2)_pt1	0.00	5.63	0.60	1.18		0.25	2.17	1.05	86.81	2.31	
3136-2024(2)_pt2	6.93	20.74	5.47	9.68	0.33	2.96			2.85	48.57	2.47

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

Pela tabela 9, a microanálise química por MEV/EDS na região da camada apresentou elementos como Zn e Al (ponto 2) típicos de camada superficial contra corrosão. Em regiões com ausência de camada (ponto 1), apresentou-se baixo valor de Zn e Al, reforçando o que a figura confirmou.

A Figura 53 mostra outra superfície da raiz do filete.

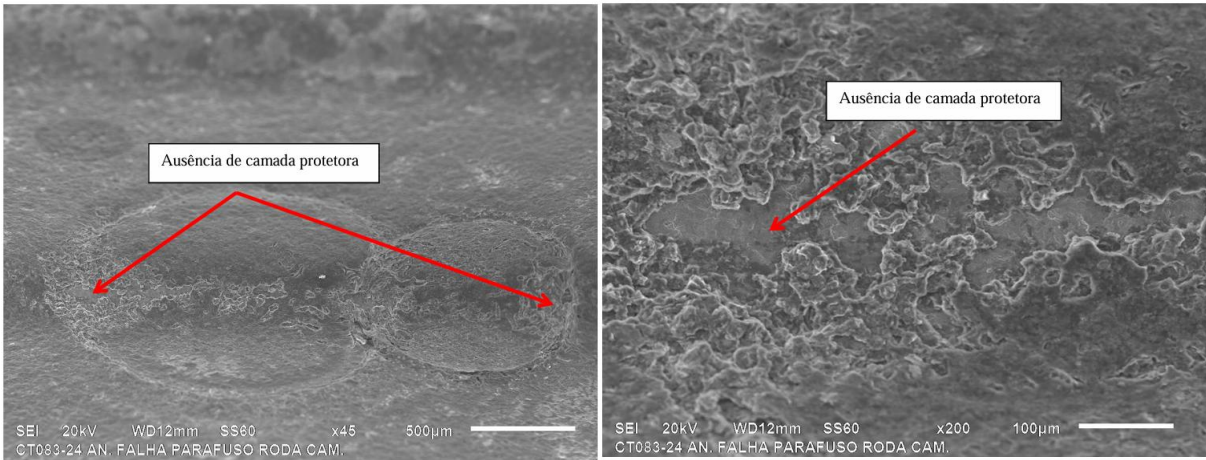


Figura 53: Superfície da raiz do filete – parafuso novo 4
Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

Os pontos destacados evidenciam a ausência de camada superficial contra a corrosão em vários pontos.

A Figura 54 mostra outra região na superfície da raiz do filete do parafuso novo 4

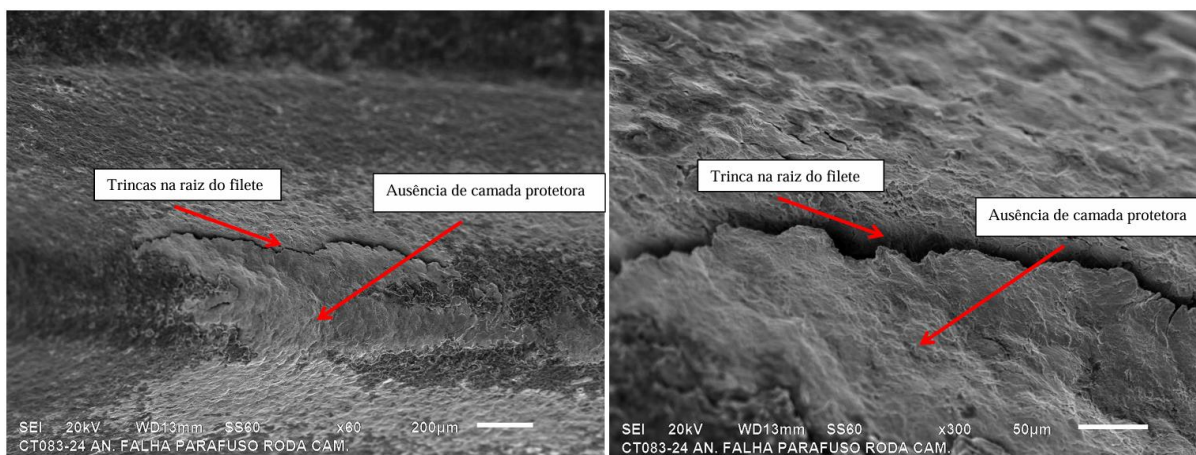


Figura 54: Superfície da raiz do filete – parafuso novo 4
 Fonte: Adaptado SENAI/LAMAT ITAUNA 3138(2024)

Foi evidenciada na região da superfície da raiz do filete a ausência de camada superficial contra a corrosão e trincas na raiz do filete.

A Figura 55 mostra a superfície lateral plana do parafuso novo 4.

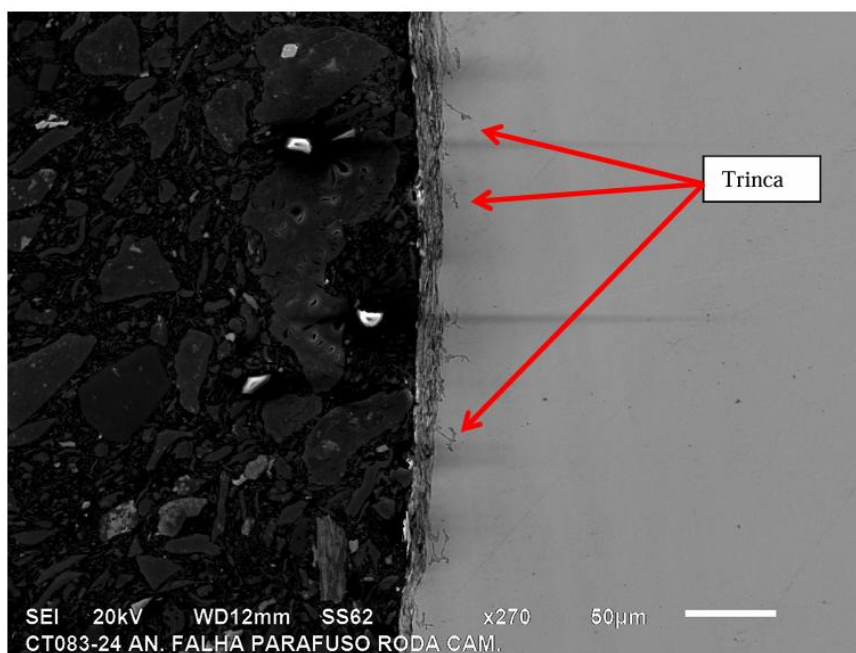


Figura 55: Superfície lateral plana do parafuso – parafuso novo 4
 Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

Foram evidenciados na figura 55 vários pontos da superfície lateral plana do parafuso, que continham trincas.

A Figura 56 mostra os pontos da superfície do parafuso novo 4 onde foi feita a microanálise química.

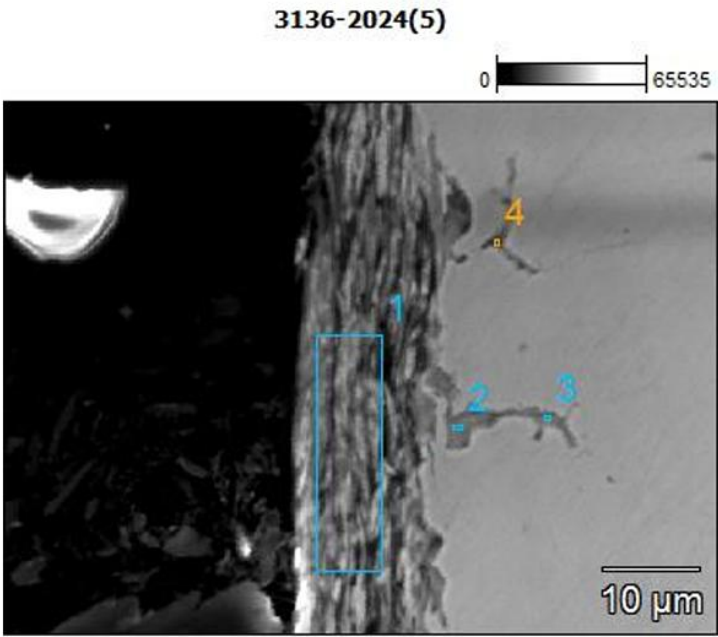


Figura 56: Superfície lateral plana do parafuso – parafuso novo 4 – 1699x
Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A figura 56 evidencia os pontos onde foram feitas as microanálises químicas, no caso, 4 diferentes pontos, onde o ponto 1 está na camada superficial e os demais nas trincas. A Tabela 13 representa a microanálise química feita na região evidenciada pela Figura 56 no parafuso 4.

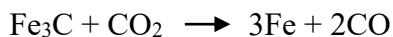
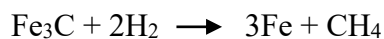
Tabela 10: Microanálise química por MEV/EDS – Parafuso novo 4

	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Zn	Mo
3136-2024(5)_pt1	4.25	21.08			1.92	6.04		0.28	0.36			2.09				1.95	59.02	3.02
3136-2024(5)_pt2	0.00	20.92	1.26	0.17	0.10	1.39	2.95			1.01	0.29			5.79	3.27	61.79	1.08	
3136-2024(5)_pt3	0.00	16.18	0.48		0.11	1.21	0.74			0.51			0.13	2.74	1.44	76.46		
3136-2024(5)_pt4	0.00	12.50	0.85			0.55	2.99			1.24				8.58	3.88	68.68	0.72	

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A microanálise química por MEV/EDS nestas regiões apresentou alguns elementos concentrados (O, P, K, Ti e V) além dos elementos principais da liga, apresentando um valor significativo de oxigênio em todos os pontos e Zn e Al mais significativos no ponto 1, evidenciando a presença da camada superficial protetora.

A descarbonetação ocorre em aços de baixa liga, em temperaturas elevadas e em presença de agentes descarbonetantes H₂, CO₂, etc. A cementita reage com esses agentes da seguinte forma:



O metano formado pode exercer pressões elevadas e causar fendimento do material metálico. Não se pode afirmar, mas sugere-se que as discontinuidades encontradas nas superfícies dos 04 parafusos possam estar associadas também ao tratamento térmico, devido à presença de descarbonetação junto a estas regiões superficiais.

4.4.3 Análise Metalográfica

A análise metalográfica por microscopia óptica foi realizada em 4 amostras, sendo: na região de início da fratura na seção longitudinal (parafuso fraturado 1 e 2), seção longitudinal na região dos filetes de rosca (parafuso empenado e parafuso novo 4). A Figura 57 apresenta as amostras analisadas.

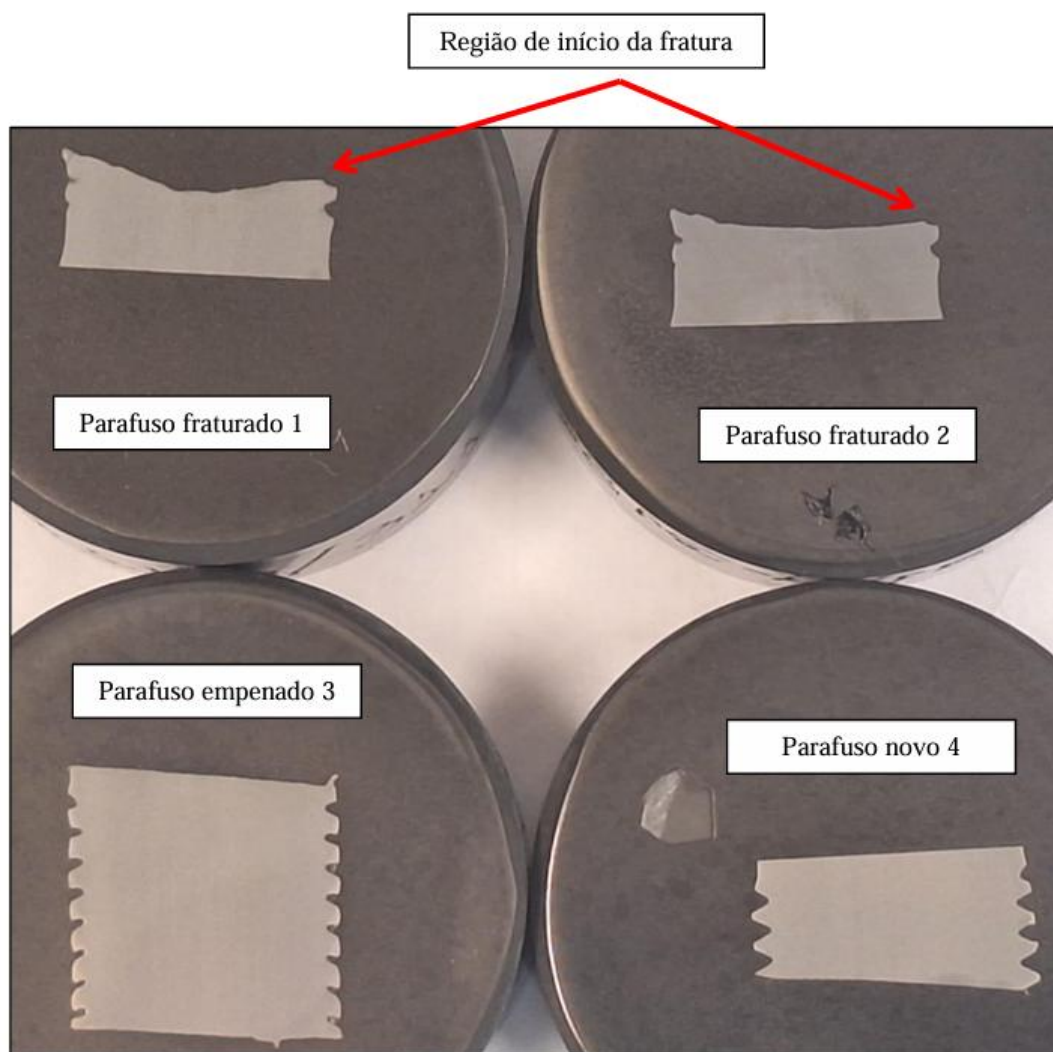


Figura 57: Amostras embutidas analisadas

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

Na Figura 57 evidenciam-se as amostras embutidas com a seção analisada por metalografia, sendo que para os parafusos 1 e 2 foram retiradas as amostras no início da fratura.

A Figura 58 mostra o resultado da análise metalográfica da superfície lateral da raiz do filete (início da fratura) – parafuso fraturado 1.

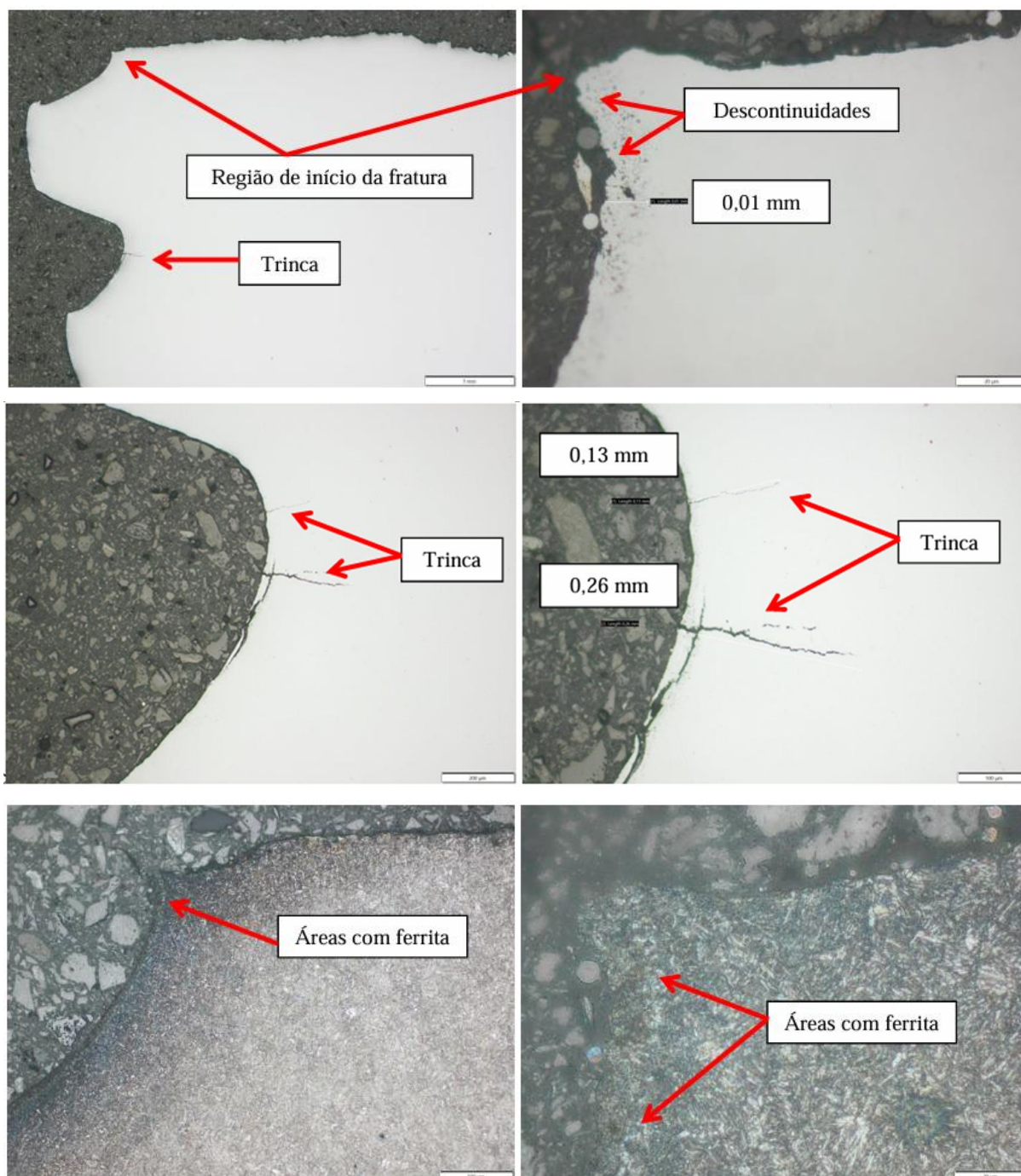


Figura 58: Superfície lateral da raiz do filete (início da fratura) – parafuso fraturado 1
Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A partir da análise da Figura 58 é possível perceber a presença de trincas e descontinuidades na extremidade da amostra, ferrita em algumas regiões da extremidade, camada superficial em algumas regiões e também raras linhas de segregação, além de inclusões dispersas na seção examinada.

A Figura 59 mostra o resultado da análise metalográfica da superfície lateral da raiz do filete (início da fratura) – parafuso fraturado 2.

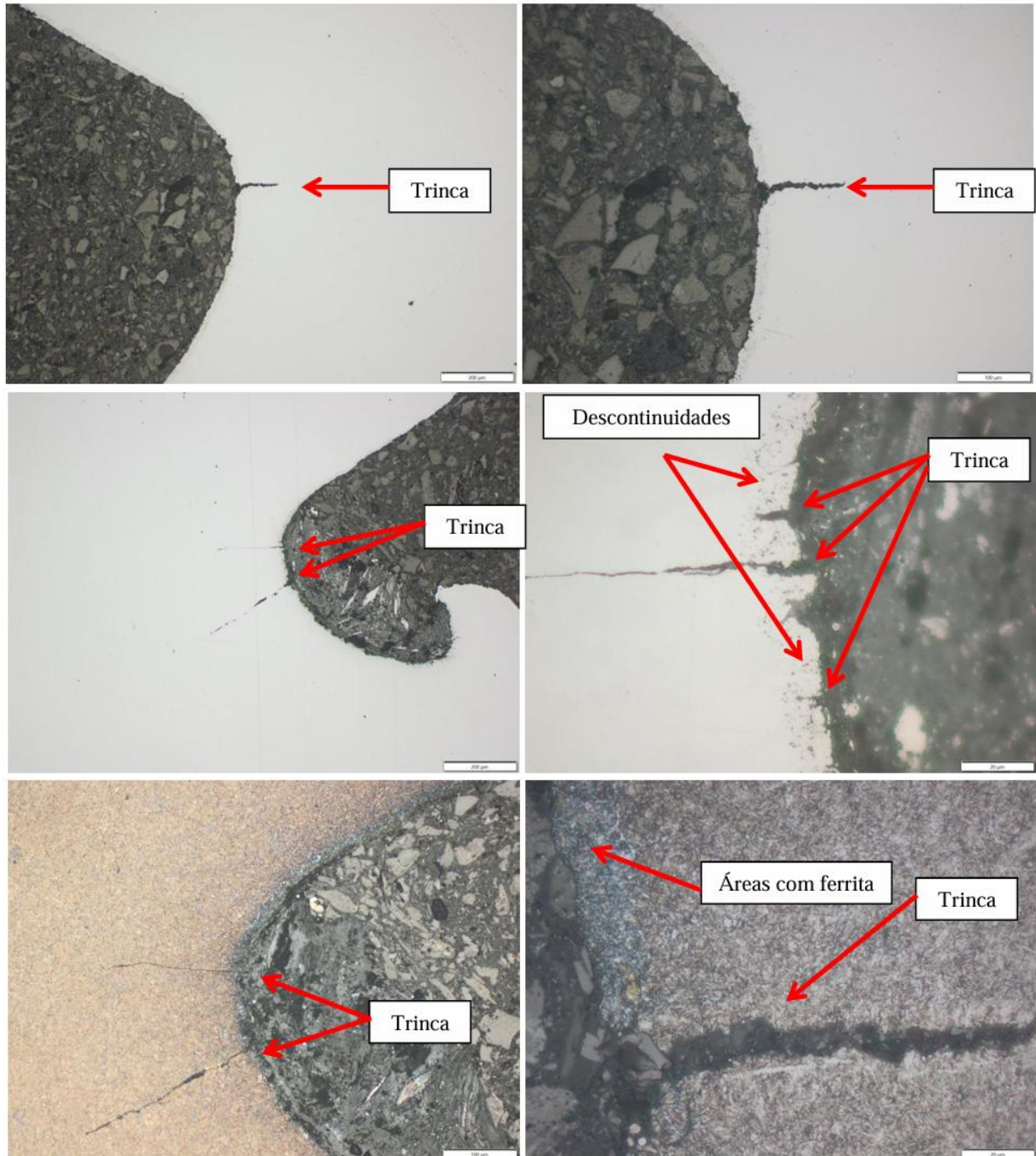


Figura 59: Superfície lateral da raiz do filete (outra região) – parafuso fraturado 2
Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A partir da análise da Figura 59 é possível perceber a presença de trincas e descontinuidades na extremidade da amostra, ferrita em algumas regiões da extremidade, camada superficial em algumas regiões da extremidade da amostra e linhas de segregação, além de inclusões dispersas na seção examinada.

A Figura 60 mostra o resultado da análise metalográfica da superfície lateral da raiz do filete – parafuso empenado 3.

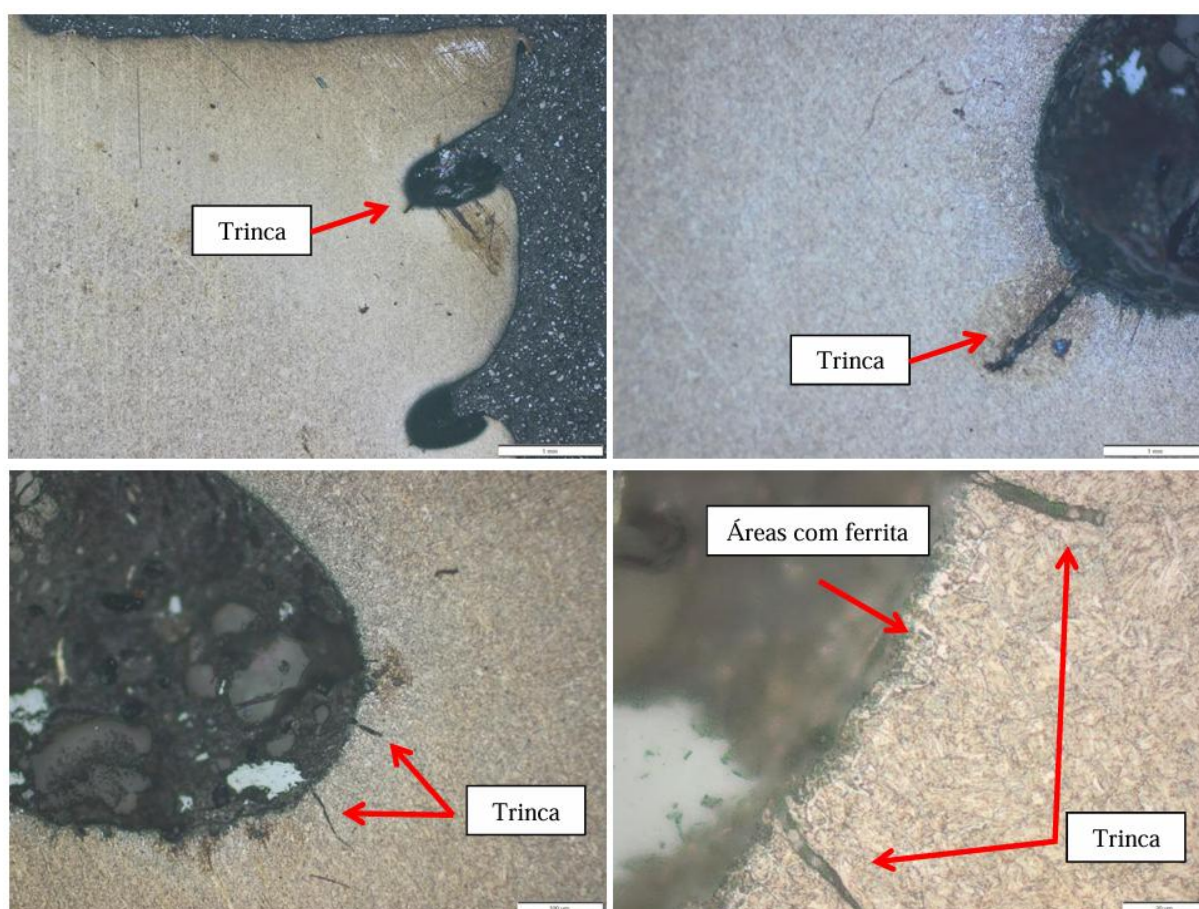


Figura 60: Superfície lateral da raiz do filete – parafuso empenado 3
Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A partir da análise da Figura 58 é possível perceber a presença de trincas e descontinuidades na extremidade da amostra, ferrita em algumas regiões da extremidade, camada superficial em algumas regiões da extremidade da amostra e linhas de segregação, além de inclusões dispersas na seção examinada.

A Figura 61 mostra o resultado da análise metalográfica da superfície lateral da crista do filete – parafuso novo 4.

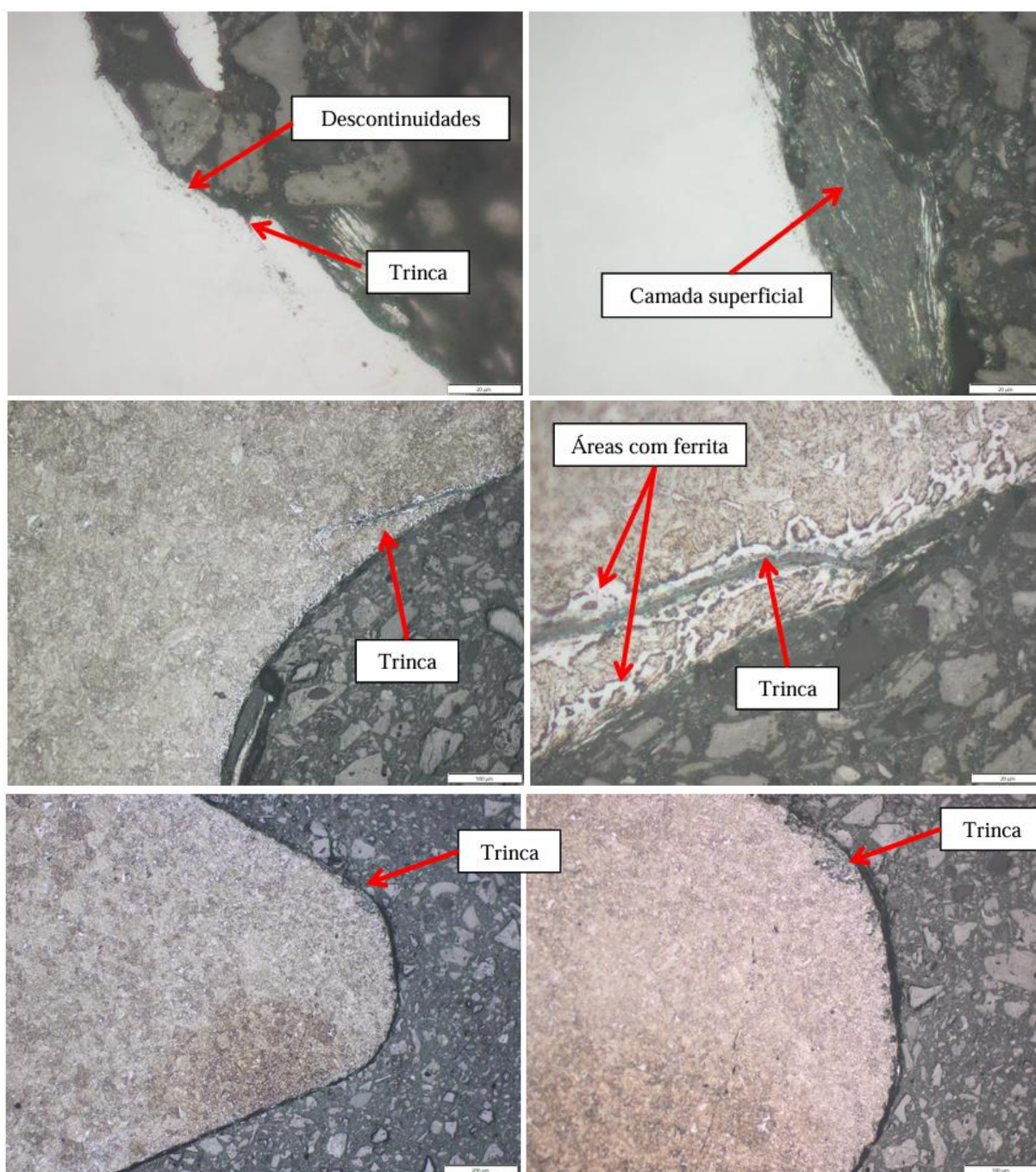


Figura 61: Superfície lateral da crista do filete – parafuso novo 4
 Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

A presença de óxidos e descarbonetação no interior das dobras ou trincas permite concluir que o parafuso novo 4 foi exposto a temperaturas elevadas e atmosferas oxidantes quando estas descontinuidades (trincas) na crista do filete já existiam. Foi observado este tipo de comportamento nesta amostra com a presença de óxidos nesta descontinuidade que é típica de defeito de dobra citado acima. Isso é típico de defeito do processo de fabricação do parafuso.

A tabela 15 representa o resumo da análise metalográfica realizada nas amostras dos 4 parafusos.

Tabela 11: Resultados obtidos nas análises metalográficas

AMOSTRA	MICROESTRUTURA	OBSERVAÇÕES
Parafuso fraturado 1	Martensita e raras regiões de bainita.	Presença de trincas e descontinuidades na extremidade da amostra, ferrita em algumas regiões da extremidade, camada superficial em algumas regiões e também raras linhas de segregação. Inclusões dispersas na seção examinada.
Parafuso fraturado 2	Martensita.	Presença de trincas e descontinuidades na extremidade da amostra, ferrita em algumas regiões da extremidade, camada superficial em algumas regiões da extremidade da amostra e linhas de segregação. Inclusões dispersas na seção examinada.
Parafuso empenado 3	Martensita e raras regiões de bainita.	Presença de trincas e descontinuidades na extremidade da amostra, ferrita em algumas regiões da extremidade, camada superficial em algumas regiões da extremidade da amostra e linhas de segregação. Inclusões dispersas na seção examinada.
Parafuso novo 4	Martensita e raras regiões de bainita.	Presença de uma trinca e descontinuidades na extremidade da amostra, presença de descarbonetação, regiões com camada superficial, ferrita localizada na região da trinca e linhas de segregação. Inclusões dispersas na seção examinada.

Fonte: Cedido pelo Laboratório que realizou a análise (2024)

4.5 Discussão dos resultados

Através da metodologia utilizada, foi possível levantar 4 hipóteses principais como causa da soltura das rodas: a reutilização de parafusos, o uso incorreto da pneumática, o excesso de torque da pneumática nova e a possível falha de fabricação dos parafusos. Para a possibilidade da falha de fabricação do parafuso foi realizada uma análise macroscópica dos parafusos e com o apoio de um laboratório foi realizada uma análise microscópica dos parafusos.

Através da análise do processo de manutenção foi possível evidenciar algumas falhas: no processo do almoxarifado, que por algumas vezes não fez a reposição de estoque corretamente; no procedimento realizado pela equipe de manutenção, que algumas vezes não estava utilizando o torquímetro; e no processo de compra de ferramentas, onde foi evidenciado a compra de uma pneumática que aplicava um torque excessivo no parafuso.

A partir da avaliação da região fraturada dos parafusos, região dos filetes, as informações técnicas repassadas pelo fabricante, os conceitos das literaturas técnicas

consultadas e a interpretação dos resultados dos ensaios e análises laboratoriais permitem concluir:

Na análise macroscópica da fratura, verificou-se que os parafusos romperam de forma aparentemente plana e sem deformação plástica aparente. Observaram-se claramente todos os estágios de uma propagação de trinca por mecanismos de fadiga mecânica que se resumem à iniciação, à propagação das trincas “marcas de praia” e à fratura final. Foi notado que as trincas iniciaram nas raízes dos filetes da rosca em planos ao redor da área útil do parafuso, formando desníveis chamados de “Marcas de Catraca”. Essas marcas de catraca provavelmente foram causadas pelo excesso de torque aplicado sobre o parafuso.

Na análise de microscopia eletrônica de varredura, foi evidenciada a fratura por fadiga mecânica devido à presença de marca de catraca nas regiões de início da fratura e marcas de praia. Junto às regiões das marcas de catraca foram vistas regiões com aspecto de corrosão nas duas amostras fraturadas. Foram vistas regiões com dimples na região de fratura monotônica (apenas um carregamento). Foi evidenciada uma maior característica microscópica da propagação da trinca por fadiga, que é a presença de estrias. As estrias são geradas quando o componente recebe picos de tensão, provocando o avanço da trinca. Esse progresso da trinca deixa uma marca na superfície de fratura na forma de um pequeno degrau. Os picos de tensão podem ter sido gerados pelo excesso de torque aplicado e pela vibração causada pela operação do caminhão.

A microanálise química por MEV/EDS nas regiões da raiz do filete e da superfície da fratura apresentou certa semelhança; não foram evidenciados valores consideráveis dos elementos Zn e Al que fazem parte de camada superficial contra a corrosão. Ressalta-se que o fabricante não repassou informação sobre especificação de camada superficial. Regiões da raiz do filete com trincas e superfície com aspecto de corrosão foram vistas no parafuso empenado 3. O parafuso novo 4 apresentou amassamentos na região da crista do filete de rosca, regiões com descontinuidades, como a ausência de camada superficial contra corrosão e trincas na região. A microanálise química por MEV/EDS na região da camada apresentou elementos como Zn e Al típicos de camada superficial contra corrosão.

Na análise metalográfica observou-se a presença de martensita e raras regiões com bainita nos parafusos 1, 3 e 4 e presença de martensita no parafuso 2. Trincas e descontinuidades foram vistas em todos os parafusos, além da presença de ferrita e linhas de deformação. A camada superficial contra a corrosão foi mais evidente no parafuso novo 4 e raras regiões com camada superficial foram vistas nos demais parafusos. Não se pode afirmar

se os parafusos usados tinham uma camada superficial com ou sem falhas ou se foram retirados durante o uso.

4.6 Recomendações

Um dos passos da MCC e da Análise das Causas-Raiz das Falhas (*Root Cause Failure Analysis* – RCFA) é definir ações recomendadas para evitar que a falha volte a ocorrer. Para a investigação da causa raiz apresentada, foi possível evidenciar algumas ações para mitigar que essa falha volte a ocorrer no futuro:

- Usar um parafuso de roda isento de descontinuidades, trincas e descarbonetação superficial, que tenha uma matriz totalmente martensítica e que tenha uma camada superficial contra corrosão efetiva para, assim, evitar o contato do meio com a superfície do aço e gerar pontos de corrosão que possam intensificar a região com o fator de concentração de tensão e garanta ainda mais a resistência mecânica exigida pelo parafuso.
- Criar sistema de reposição automática para determinados itens críticos do almoxarifado para não correr risco de que eles falem no futuro.
- Trocar a pneumática que está sendo utilizada por uma com torque máximo inferior.
- Criar procedimento para compra de ferramentas, no qual se inclua a verificação das especificações técnicas do fabricante.
- Instruir a equipe a usar a pneumática apenas no nível 1 ou bloquear o uso dos níveis superiores para evitar excesso de carga no aperto dos parafusos.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

O ponto de partida desta pesquisa buscou entender o problema associado aos eventos de soltura de rodas em uma frota de caminhões e para isso, buscou-se responder a pergunta: “Como aplicar a MCC para investigação das causas de soltura das rodas de caminhões em uma mineradora?” e a partir dela aplicou-se algumas técnicas usadas na Manutenção centrada na confiabilidade - MCC associadas a metodologia de Análise das Causas-Raízes das Falhas – RCFA, que é um método ordenado de busca da causa raiz de uma falha para determinar ações apropriadas para evitar sua reincidência, onde nele é obrigatório o uso dos 5 Porquês, mas nesse modelo também foi usado o Diagrama de Ishikawa.

Através da metodologia utilizada, foram levantadas 4 hipóteses principais como causa raiz para a soltura das rodas: a reutilização de parafusos, o uso incorreto da pneumática, o excesso de torque da pneumática nova e a possível falha de fabricação dos parafusos. Para a possibilidade da falha de fabricação do parafuso foi realizada uma análise macroscópica dos parafusos e com o apoio de um laboratório foi realizada uma análise microscópica dos parafusos.

Diante dos resultados analisados na análise dos parafusos, foi possível confirmar que os dois parafusos fraturados (1 e 2) analisados apresentavam uma associação de anomalias, com uma camada de descontinuidade associada à presença de ferrita (descarbonetação) na superfície da raiz do filete de rosca e presença de áreas de corrosão na raiz do filete, sendo a raiz do filete de rosca uma região de maior concentração de tensão durante o uso. Ressalta-se que o parafuso empenado 3 já apresentava várias trincas junto às anomalias citadas que podem ter sido agravadas pelo excesso de torque no processo de aperto. No parafuso novo 4, por não ter tido uso, não era esperado encontrar falhas, porém foram encontrados problemas como trincas, descarbonetação, regiões com descontinuidades e regiões com ausência da camada superficial contra a corrosão, tornando o parafuso propício às mesmas falhas quando em uso.

Por fim, pode-se concluir que a causa raiz para a soltura dos parafusos de roda foi a associação dos problemas evidenciados nos parafusos novos junto com o excesso de torque utilizado pela equipe, que com uso da pneumática nova que possuía um torque muito superior que a ferramenta anteriormente utilizada sobrecarregou os parafusos, gerando picos de tensão e marcas de catraca que posteriormente geraram uma fratura por fadiga e a soltura das rodas.

5.2 Recomendações

A partir do estudo realizado, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Desenvolver metodologia específica para investigação e tratamento de falha que atenda especificamente caminhões em mineração;
- Desenvolvimento do PDCA a partir das ações feitas nesse estudo, metrificando os resultados após um período para análise de melhoria de processos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT. **NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos – Ensaio de tração – Parte 1.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

AGUIAR, M. C. **Análise da causa raiz: levantamento dos métodos e exemplificação.** 2014. 153f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.

BELL, Judith. **Doing your research project: a guide for first-time researchers in education and social science.** 2. reimp. Milton Keynes, England: Open University Press, 1989.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction.** 9. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro. **Gestão da Qualidade: conceitos e técnicas.** 2. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

CASTRO, C. M. **Estrutura e apresentação de publicações científicas.** São Paulo: McGraw-Hill, 1976

CORRÊA, Fernando Ramos. **Gestão da qualidade.** Volume Único / Fernando Ramos Corrêa. – Rio de Janeiro : Fundação Cecierj, 2019.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** 7. ed. São Paulo: ABM, 2005.

DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1981.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luís Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial.** Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2009.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GODEFROID, Leonardo Barbosa; CÂNDIDO, Luiz Cláudio. **Análise de falhas: conceitos, fundamentos e aplicação.** 1. ed. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e Análise da Economia Mineral Brasileira,** 2012. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>. Acesso em: 07 de maio de 2025.

JARDIM, E. G. **Manutenção Preditiva: teoria e prática.** Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2007.

- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 4ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2015.
- LAFRAIA, João Ricardo Barusso. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora: Petrobras, 2014.
- LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas 2003
- LIMA, M.H.M.R.; TEIXEIRA, N.S. **O trabalho infantil em cadeias produtivas de base mineral**, in Castilhos, Z.; Lima, M.H.M.R.; Castro, N.F.(orgs), *Gênero e Trabalho Infantil na Pequena Mineração*, CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2006.
- MATTAR, F. N. **Pesquisa de marketing**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2001.
- MILLER, Brett A., Roch J. Shipley, Ronald J. Parrington, and Daniel P. Dennies. *Failure Analysis and Prevention*, Vol. 11, ASM Handbook, ASM International, 2002.
- MOBLEY, R. K. *Root Cause Failure Analysis*. New York: Butterworth-Heinemann, 1999.
- MOURA, J. A. **Manutenção centrada na confiabilidade (RCM): aplicação e benefícios**. São Paulo: EPUSP, 2012.
- OREDA. **Offshore Reliability Data Handbook**. Trondheim. 2002
- PACCOLA, José Eduardo. **Manutenção e Operação de Equipamentos Móveis**. 2. ed. São José dos Campos: TBN Gráfica e Editora, 2017.
- PACHECO, A. C.; OLIVEIRA, J. P. **Engenharia de Materiais: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades**. 3. ed. São Paulo: Hemus, 2000.
- REED-HILL, R. E. **Principios de Metalurgia Física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. P. 754.
- RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3ª edição revisada e ampliada. São Paulo: Atlas, 2015.
- SANTOS, C. A.; MEI, P. R. **Ciência e Tecnologia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2017.
- SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico**. 24. ed. São Paulo: Cortez, 2018. 320p.

- SOUZA, S. A.; MEI, P. R. **Materiais de Engenharia: microestrutura e propriedades**. 8. ed. São Paulo: Blucher, 2010.
- SOUZA, C. R.; BORGES, R. C. **Gestão da Manutenção: conceitos, ferramentas e estratégias**. São Paulo: Atlas, 2019.
- SILVA, A. L. V. **Metalurgia Física**. São Paulo: Blucher, 2007.
- TELES, J. **Guia Prático para implantação de indicadores de manutenção**. Brasília: Engeteles Editora, 2018.
- TIMÓTEO, Josimar Nunes. **Importância da Utilização de Análise de Falha para a Performance da Manutenção Industrial**. 2018. 9f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade Ietec, Belo Horizonte, 2018.
- TRIVELLATO, A. A. **Aplicações das sete ferramentas básicas da qualidade no ciclo PDCA para melhoria contínua: estudo de caso numa empresa de autopeças**. 2010. 73 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2004.
- VERZANI & SANDRINI. **O que é Manutenção Centrada em Confiabilidade?** 2021. Disponível em: <<https://www.verzani.com.br/blog/manutencao-centrada-em-confiabilidade/>>. Acesso em: 12 de maio. 2025.
- VIANA, Hebert Ricardo García. **Planejamento e Controle da Manutenção**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ed. Qualitymark, 2002.
- XENOS, Harilaus G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva**. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda., 2004.
- WULPI, D. J. **Understanding How Components Fail**. 2nd Ed. Ohio: ASM International, 1999.