



CAUÊ CALAZANS LUZ RIBEIRO

**ANÁLISE DE FALHAS DE QUEBRAS DE PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DO
ALIMENTADOR DE SAPATAS DE SERRA LESTE**

Parauapebas, PA

2023

Cauê Calazans Luz Ribeiro

**ANÁLISE DE FALHAS DE QUEBRAS DE PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DO
ALIMENTADOR DE SAPATAS DE SERRA LESTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista em desgaste, atrito e lubrificação.

Área de concentração: Tribologia

Orientador: Gustavo Tressia, Dr.

Parauapebas, PA

2023

Título: ANÁLISE DE FALHAS DE QUEBRAS DE PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DO ALIMENTADOR DE SAPATAS DE SERRA LESTE

Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (x) Pública

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação(CIP)

R372a

Ribeiro, Cauê Calazans Luz

Análise de falhas de quebras de parafusos de fixação do alimentador de sapatas de Serra Leste. Cauê Calazans Luz Ribeiro ... [et al.] - Ouro Preto, MG: ITV, 2023.

75 p.: il.

Monografia (Especialização latu sensu) - Instituto Tecnológico Vale, 2023.
Orientador: Gustavo Tressia

1. Análise de Falha. 2. Alimentador de Sapatas. 3. Parafusos. 4. Tribologia. 5. Fratura I. Tressia, Gustavo. II. Título.

CDD.23. ed. 621.89

Cauê Calazans Luz Ribeiro

**ANÁLISE DE FALHAS DE QUEBRAS DE PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DO
ALIMENTADOR DE SAPATAS DE SERRA LESTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Desgaste, Atrito e Lubrificação].

Orientador: Prof. D.Sc. Gustavo Tressia de Andrade

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 21 de novembro de 2023 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. D.Sc. Gustavo Tressia de Andrade
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Prof. D.Sc. Philip von Pritzelwitz
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV)

Prof. D.Sc. Luiz Henrique Dias Alves
Membro externo – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 ("MP nº 2.200-2").



PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/A77F-01ED-D1E8-189B> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale. To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/A77F-01ED-D1E8-189B> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: A77F-01ED-D1E8-189B



Hash do Documento

735B4E523FC7E4F71B75929D69F79B57E5A97F0DFB283E492A23B89D1EEA3E30

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 24/11/2023 é(são) :

- Philip von Pritzelwitz (Signatário) - 765.478.098-20 em 23/11/2023 16:03 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: philip.pritzelwitz@itv.org; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Thu Nov 23 2023 16:02:45 GMT-0300 (Hora padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -25.0534806 Longitude: -50.170385 Accuracy: 1031.050672549182

IP 200.192.99.110

Hash Evidências:

C625EAB6C3EAA241C422C4A944DF140713568D6F0948D079A72C00DF66144543

- Gustavo Tressia de Andrade (Signatário) - 079.170.816-05 em 23/11/2023 14:41 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: gustavo.tressia@itv.org; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Thu Nov 23 2023 14:41:06 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Location not shared by user.

IP 189.98.254.40

Hash Evidências:

8858103FFB4BD5DF43F48AA45757E3AFF5E2A45E2CEF7E7CE0D41ED6695AD4C2

- Luiz Henrique Dias Alves (Signatário) - em 23/11/2023 14:36 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: luizalves@engenharia.ufjf.br; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Thu Nov 23 2023 14:36:36 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -21.7820541 Longitude: -43.3777179 Accuracy: 10023.33603905372

IP 200.131.56.49

Hash Evidências:

0E14DFDBAFDFDE7045B25EAE14C5D7F5E4FEBF7DC2C137EBA529198507FAF26F



Dedico a minha família, em especial minhas filhas Marina e Manuela, com as quais tive que, em certas ocasiões, privar meu tempo e atenção para me dedicar a fazer a especialização da melhor forma possível, com isso busquei também ser uma boa referência e exemplo para elas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus líderes, representantes da empresa Vale, por acreditarem e depositarem a confiança em mim e contribuir com o investimento em meu capital intelectual. Com essa especialização já me sinto mais preparado e apto a contribuir ainda mais qualitativamente com a empresa.

Agradeço também ao meu orientador Gustavo Tressia pelo apoio e direcionamento para a construção desse trabalho.

Agradeço aos colegas de trabalho que contribuíram para o sucesso desse trabalho, o Matheus Santiago, Leonardo Gomes, Fabio Thom, Shaney Mileipe, Jose Cleber Rodrigues, Willia Silva Reis, Michel Domingos, Jolivan Leite, Alysson Bosso e todos do time de manutenção e planejamento de Serra Leste que estiveram juntos.

“Uma pessoa que nunca cometeu um erro, nunca tentou nada de novo.” Albert Einstein.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise de causas de paradas operacionais de um alimentador de sapatas da usina de beneficiamento mineral de Serra Leste, em Curionópolis – PA, que causaram significativos impactos na produção. As principais paradas foram para manutenção que envolviam a substituição dos parafusos, fraturados, que tinha a função de fixação das sapatas na esteira. Estas falhas começaram a ocorrer após a substituição do conjunto de esteiras e sapatas do equipamento. Diversas análises foram realizadas, algumas medidas foram implementadas, a taxa de falhas reduziu, porém, falhas continuaram a ocorrer, fato esse que era muito raro com o conjunto antigo montado. Diante do cenário apresentado foi elaborada a análise de falhas que será apresentada nesse trabalho. Para a elaboração, foi considerada como base a metodologia de análise de falhas utilizada na Vale, complementada com estudos avançados fundamentados na literatura. Foram realizadas análises de superfície de fratura, ensaios e análises de composição química, metalográfica e ensaio de dureza de dois modelos de parafusos fixadores das sapatas utilizados pela equipe de manutenção, um modelo ARS (projeto original do equipamento) e outro CAT. Essas análises foram realizadas para comparar as propriedades dos dois modelos e se certificar de que atendem a necessidade. Através do trabalho desenvolvido identificou-se que os parafusos romperam por fadiga, apresentando vários pontos de início junto à superfície externa da peça. A falha possivelmente foi estimulada pelos frequentes esforços aos quais as peças foram submetidas causando movimento de flexão das sapatas com a queda do minério sobre elas. Com isso foi possível encontrar a causa raiz do problema, que foi oriunda de uma intervenção de manutenção com falhas no planejamento, além de causas contribuintes, tratá-las de forma estruturada, planejar uma nova oportunidade de intervenção com as tarefas de correção necessárias e mitigar o modo de falha.

Palavras-chave: Análise de falhas. Alimentador de sapatas. Parafusos. Tribologia. Fratura.

Fase da Cadeia: Manutenção de Usina

ABSTRACT

This work presents an analysis of the causes of operational stoppages of an apron feeder at the Serra Leste mineral processing plant, in Curionópolis – PA, which caused significant impacts on production. The main stops were for maintenance, which involved replacing the fractured bolts that were used to fix the shoes on the conveyor belt. These failures began to occur after replacing the equipment's set of tracks and shoes. Several analyzes were carried out, some measures were implemented, the failure rate reduced, however, failures continued to occur, a fact that was very rare with the old set assembled. Given the scenario presented, the failure analysis that will be presented in this work was developed. For the preparation, the failure analysis methodology used at Vale was considered as a basis, complemented with advanced studies based on literature. Fracture surface analyses, tests and analyzes of chemical and metallographic composition and hardness tests were carried out on two models of shoe fastener bolt used by the maintenance team, one model ARS (original equipment design) and the other CAT. These analyzes were carried out to compare the properties of the two models and make sure they meet the need. Through the work carried out, it was identified that the bolt broke due to fatigue, presenting several starting points close to the external surface of the part. The failure was possibly stimulated by the frequent stresses to which the pieces were subjected, causing flexing movement of the shoes as the ore fell onto them. This made it possible to find the root cause of the problem, which appeared from a maintenance intervention with planning failures, in addition to contributing causes, treat them in a structured way, plan a new intervention opportunity with the necessary correction tasks and mitigate the failure mode.

Keywords: Failure analysis, apron feeder, screws, tribology, fracture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Alimentador de Sapatas AL 1210 KL 01	17
Figura 2: Cronologia dos fatos (1ª parte).....	18
Figura 3: Cronologia dos fatos (2ª parte).....	18
Figura 4: Alimentador de sapatas com 1 sapata faltante	19
Figura 5 - Índice de acidentes aéreos site Aviation Safety Network.....	22
Figura 6 - Imagem da superfície de fratura dos dois componentes “A” e “B”.....	29
Figura 7 - Imagem da superfície de fratura da amostra “A”, indicando a região de início da falha	29
Figura 8 - Imagem da superfície de fratura da amostra “B”, indicando a região de início da falha.	30
Figura 9 - Imagens em lupa de baixo aumento mostrando a superfície de fratura das amostras “A” e.....	30
Figura 10 – Superfície de fratura do parafuso	31
Figura 11 – Vista frontal da superfície de fratura da imagem A com marcações	31
Figura 12 – Zona A da superfície de fratura. A linha de propagação da trinca.....	33
Figura 13 – Origem da Fratura	33
14 – Microfraturas relacionadas a estrias de fadiga.	34
Figura 15 - Foto da superfície da fratura do parafuso	35
Figura 16 - Fotos de várias superfícies de parafusos fraturadas.....	36
Figura 17 - Parafusos fraturados limpos modelo ARS e CAT	37
Figura 18 - Superfícies fraturadas aumentadas em 7x.....	37
Figura 19 - Posição de corte da amostra do parafuso	38
Figura 20 - Amostra preparada em baquelite	38
Figura 21 - Corte da amostra no sentido transversal	39
Figura 22 - Amostra de corte transversal em baquelite	39
Figura 23 - Amostras para o ensaio de tração	40
Figura 24 - Métrica para aplicação de pesos	41
Figura 25 - Descrição das fases de planejamento da parada de manutenção	41
Figura 26 - Régua de maturidade	42
Figura 27 - Diagrama de precedência da parada	42
Figura 28 - Superfície de fratura com indicação de” marcas de praia”	44

Figura 29 – Processo de evolução da falha para a fratura	44
Figura 30 - Microestrutura da amostra ARS analisada em microscópio óptico.....	46
Figura 31 - Microestrutura da amostra CAT analisada em microscópio óptico.....	46
Figura 32 - Representação da flexão nas sapatas por conta de impacto.....	48
Figura 33 - Detalhamento da folga entre a sapata e o trilho do AL	49
Figura 34 - Camada de material para amortecer impacto sobre o AL.....	50
Figura 35 - Gráfico de Ishikawa.....	51
Figura 36 - Procedimento de substituição do AL	52
Figura 37 - Esteira distante do rolo de carga.....	53
Figura 38 - Roda dentada com marcas na lateral dos dentes.....	54
Figura 39 - Roda guia menor que a de projeto	55
Figura 40 - Parafusos de fixação diversos	55
Figura 41 - Tirante do carro tensor empenado	56
Figura 42 - Parafusadeira usada erroneamente.....	56
Figura 43 - Recomendação de ferramenta para torque.....	57
Figura 44 - Minério acumulado no retorno do AL	58
Figura 45 - Equipe de manutenção corrigindo fixação da sapata.....	58
Figura 46 - Arvore de falhas para eliminar as quebras de parafusos do AL	60
Figura 47 - Gráfico da maturidade da parada de manutenção.....	61
Figura 48 - Simulação de Monte Carlo da parada de manutenção	62
Figura 49 - Análise de riscos da parada.....	63
Figura 50 - Manutenção no eixo de acionamento do AL	64
Figura 51 - Substituição do carro tensor do AL	64
Figura 52 - Substituição dos parafusos de fixação das sapatas do AL	65
Figura 53 - Topografia do Alimentador de Sapatas	65
Figura 54 – Número de falhas x tempo	66
Figura 55 – Curva de MTBF instantâneo x tempo	67
Figura 56 - Paretos de causas e modos de falha	68
Figura 57 - Histórico de falhas - duração (horas).....	69
Figura 58 - Histórico de falhas - eventos (quantidade)	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação das Técnicas de Análise de Falhas	24
Tabela 2 - Resultados da medição de dureza dos parafusos.....	47
Tabela 3 - Resultados dos testes de tração dos parafusos.....	47

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AL – Alimentador de Sapatas

PDCA - do inglês, “Plan–Do–Check–Act”, que significa Planejar-Fazer-Verificar-Agir

OACI - Organização internacional de aviação civil

CPIA – Comitê de Prevenção e Investigação de Acidentes

FTA – do inglês “Fault Tree Analysis”, que significa árvore de falhas

RCA – do inglês “Root cause analysis”, que significa análise de Causas Raiz

MCS – Modo de falha, causa e solução

CAT – Parafuso da marca Caterpillar

ARS – Parafuso da marca ARS

PRO – Procedimento Operacional

PGS – Procedimento Geral

SAP – Sistema Informatizado de manutenção

LDA – do inglês “Life Data Analysis”, que significa análise de dados de vida

UNF e UNC – Tipos de rosca de parafusos

ITV – Instituto Tecnológico Vale

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

DF – Disponibilidade Física

UF – Utilização Física

MTBF – Tempo médio entre falhas

MTTR – Tempo médio para reparo

SUMÁRIO

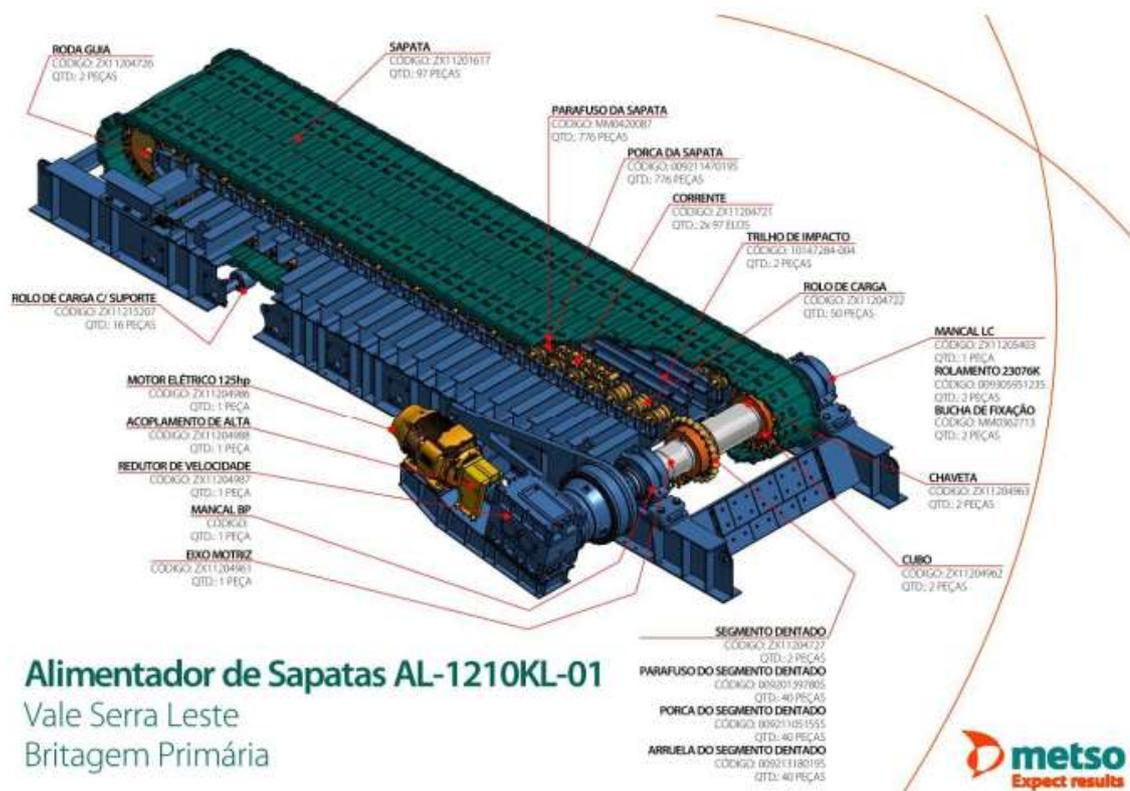
1	INTRODUÇÃO	17
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	21
2.1	Metodologia de Análise de Falhas	21
2.1.1	Coleta de dados	22
2.1.2	Análise... ..	23
2.1.3	Conclusões	25
2.1.4	Recomendações de segurança.....	25
2.2	Análise de falha aplicada a parafusos	26
2.2.1	Mecanismos de falhas de parafusos.....	27
3	METODOLOGIA	35
3.1	Análise de falha e verificação dos parafusos	35
3.2	Identificação da causa raiz e ações de manutenção	40
4	Resultados	44
4.1	Verificação de hipóteses	51
4.2	Planejamento para a grande parada da usina	60
4.3	Análise de eficácia	66
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

Em julho de 2022, após a atividade de substituição do conjunto esteiras e sapatas do equipamento alimentador de sapatas da usina de beneficiamento mineral de Serra Leste, em Curionópolis/PA, o equipamento passou a ter sua produção impactada por muitas paradas operacionais, em alguns casos com duração elevada, para a manutenção e principalmente substituição dos parafusos de fixação fraturados das sapatas na esteira.

O trabalho de diagnóstico foi iniciado em agosto de 2022, após a intervenção para substituição do Alimentador de Sapatas, que estava em fim de vida útil, por um conjunto novo, apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 1: Alimentador de Sapatas AL 1210 KL 01



Fonte: Metso (Manual do Alimentador de Sapatas).

Após a substituição do conjunto ele apresentou uma série de falhas, que estão apresentadas na cronologia dos fatos expostos na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**. Dentre as falhas que ocorreram, destaca-se as quebras de parafusos devido a sua elevada incidência.

Figura 2: Cronologia dos fatos (1ª parte)



Fonte: O autor.

Figura 3: Cronologia dos fatos (2ª parte)



Fonte: O autor.

A primeira quebra dos parafusos de fixação das sapatas foi no dia 24/08/22, nesta ocorrência teve também o desprendimento de uma sapata e danos no mancal da roda guia, onde foi executado manutenção com solda no dia 30/08/22. No dia 31/08, houve a quebra da roda guia e o equipamento seguiu em manutenção até dia 02/09. A produção da Usina 1 no período de 30/08/22 a 03/09/22 foi fortemente impactada pela quebra dos parafusos da sapata do AL1210KL-01. Nesse período, totalizaram 81,1 horas de parada por manutenção corretiva no equipamento, gerando uma perda de 69,7 kt na produção da Usina 1 no período, tomando como base a capacidade nominal do AL1210KL-01 (1.000t/h) contribuindo para uma produção abaixo do plano de produção nos meses de agosto e setembro de 2022. Na Figura 5 observa-se a ausência de sapatas nas esteiras do Alimentador, o que motivou a parada do equipamento para intervenção da equipe de manutenção.

Figura 4: Alimentador de sapatas com 1 sapata faltante



Fonte: O autor.

No dia 15/09/22 foi realizada uma intervenção para manutenção no equipamento e foram identificados vários parafusos danificados. Nos dias seguintes ocorreram várias paradas críticas para manutenção, impactando na produção da usina 1 de Serra Leste até uma nova parada para manutenção no dia 04/10/22, em que foi realizada a reposição de sapatas e de parafusos.

Em 05/09/22 foi feita uma primeira análise de falhas, com base nos fatos obtidos no momento, onde foram direcionadas algumas orientações. Em outubro de 2022 foi feito um segundo atendimento de campo, onde foi realizado um PDCA (do inglês, “Plan–Do–Check–Act”, que significa Planejar-Fazer-Verificar-Agir) em busca de outras possíveis

causas para as quebras dos parafusos de fixação das sapatas do AL 1210KL01. Adicionalmente, foram realizadas análises por meio da metodologia CPIA.

Como resultado do PDCA observamos a oportunidade de utilizar a metodologia de árvore de falhas (FTA – Fault Tree Analysis), onde foram levantadas diversas hipóteses de falha, como parte da análise foram coletadas amostras de parafusos e enviados para análises de laboratório. Com isso, passaram a ser testadas e eliminadas, assim foi possível priorizar as causas contribuintes e direcionar a equipe de manutenção de forma mais assertiva.

O objetivo deste trabalho é apresentar a análise de falhas dos parafusos de fixação das sapatas no alimentador de sapatas da usina de Serra Leste, mostrar como foi encontrada a causa raiz e compartilhar o conhecimento com os interessados.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentadas práticas teóricas utilizadas para análises de falhas e análises de fraturas de parafusos. Pretende-se demonstrar o estado da arte sobre os assuntos relevantes à temática da pesquisa proposta, com base em publicações técnicas e científicas, sobretudo artigos científicos nacionais e internacionais.

Para melhor discorrer sobre o trabalho, esta revisão da literatura será dividida em duas partes, uma tratando sobre metodologia de análise de falhas e a segunda sobre análise de fratura de parafusos.

2.1 Metodologia de análise de falhas

Para a metodologia vamos nos fundamentar nas tratativas do assunto que existem no mundo da aviação, os mais rigorosos, confiáveis e em melhoria constante.

No site da Aviation Safety Network (organização privada que monitora acidentes aéreos com dados desde 1942) são apresentados dados que mostram estatisticamente a franca evolução da segurança no setor da aviação. A Figura 6 mostra que em 2022 ocorreram 115 ocorrências gerais com voos, sendo 4 acidentes fatais, gerando 233 fatalidades. A média dos últimos 5 anos para voos com passageiros é de 15 fatalidades/ano. O pior ano registrado foi o de 1972 com 2429 mortes, seguido pelo ano 1985 quando ocorreram 2391 fatalidades.

Os avanços científicos, representados na fabricação de aeronaves e no transporte de passageiros e de cargas, fez também com que a abordagem dos acidentes aeronáuticos tivesse uma metodologia científica. Tal abordagem científica, aliada à normalização de procedimentos, previne e torna a aviação extremamente seguro, por isso é uma boa referência.

Figura 5 - Índice de acidentes aéreos site Aviation Safety Network



Fonte: Flight safety foundation.

A Organização internacional de aviação civil (OACI) publicou o anexo 13 na parte 1 que trata sobre organização e planejamento do Doc 9756, Manual of Aircraft Accident and Incident Investigation, que desenvolve sobre Investigação de incidentes e acidentes com aeronaves, para a convenção internacional de aviação civil. Neste documento constam orientações para investigações de acidentes com aeronaves, ele é dividido em quatro partes que auxiliam no desenrolar da atividade, ou seja, coleta dos fatos, análise, conclusões e recomendações de segurança, itens que serão mais bem detalhados a seguir.

2.1.1 Coleta de dados

Nesta etapa devem constar informações gerais sobre o acidente, história do voo, com descrições do voo e dos eventos que antecederam o acidente incluindo uma linha do tempo com a reconstrução dos fatos, dados sobre pessoas acidentadas, danos da aeronave, além de relatos pessoais das pessoas envolvidas no acidente, em especial da tripulação, serviços de tráfego, manutenção entre outros. Dados sobre a aeronave (historico de manutenção, desempenho, combustível usado), condições meteorológicas, sistemas de monitoramento (GPS, navegadores), rádios comunicadores, informações sobre os destroços e impactos (informações gerais sobre o local do acidente e o padrão de distribuição dos destroços, falhas de material detectadas ou mau funcionamento de componentes. Detalhes sobre a localização e estado dos diferentes pedaços dos destroços normalmente não são necessários, a menos que seja necessário indicar uma ruptura da aeronave antes do impacto. Diagramas, gráficos e fotografias podem ser incluídos nesta seção ou anexados nos Apêndices). Além desses dados devem ser coletados também informações médicas sobre os tributantes, em especial piloto e copiloto, informações sobre

incêndio e sistema de combate a incêndio, caso existam, e aspectos de sobreviventes, dados de testes e pesquisas, informações pertinentes sobre a organização e a gestão envolvida que podem influenciar a operação da aeronave, e informações de técnicas de investigação úteis ou eficazes que tenham sido aplicadas.

Na realidade deste trabalho foram coletados os seguintes dados: histórico de falhas, relatos de operação e manutenção, procedimentos, amostras de parafusos fraturadas, dados registrados nos sistemas de monitoramento eletrônicos, ferramentas e recursos utilizados, tempo entre falhas, entre outros.

2.1.2 Análise

Esta etapa consiste em analisar de forma lógica um item que falhou, identificar e analisar o mecanismo, a causa e as consequências da falha, e então encontrar a causa raiz para o devido tratamento. As análises de falhas podem ser realizadas sem um processo prévio de priorização, para uma falha crítica, ou de forma sistematizada, como etapa complementar ao processo de perfil de perdas.

A ocorrência de uma ou mais falhas, pode estar relacionada aos processos e não somente a um determinado ativo. Por isso, a confiabilidade deve estar conectada com todos os processos da função manter e operar, suportando o resultado esperada.

Analisar a causa raiz dos problemas mapeados utilizando um método como Análise de Causas Raiz (RCA), 5 Por quês, MCS, Diagrama de Ishikawa, entre outras metodologias adequadas ao fenômeno avaliado. Para casos de análises mais complexas devem ser utilizados métodos estatísticos.

T. Dobashi and F. Corrêa (1999) apresenta certas técnicas que são mais fáceis de se usar do que outras, em um particular tipo de problema, sob certas circunstâncias, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação das Técnicas de Análise de Falhas

Natureza do Problema	AM	AB	AEFC	DA
Organizacional	Boa	Ótima	—	Melhor
Atividade ou Processo	Boa	Ótima	Boa	Melhor
Reorganização	Ótima	Boa	—	Melhor
Atividade nova /reorganizada	Ótima	Melhor	—	Boa
Pessoal	Boa	Ótima	Melhor	—
Acidente ou Incidente	Boa	Melhor	Ótima	Boa

AM - Análise de Mudança

AB - Análise de Barreira

AEFC - Análise de Eventos e Fatores de Causa

DA - Diagramas de Árvore

Fonte: O autor.

Devido ao cenário em estudo ser muito amplo e disperso, tratando de problemas de atividades ou processo temos que o método mais adequado para a análise de falhas em questão seria a árvore de falhas.

Tal método também é conhecido segundo Huevel et al. (2008) por Análise de Árvore de Causa e Efeito; o autor também aborda que este tipo de Análise é a melhor ferramenta para problemas de software, equipamentos e problemas crônicos, além de também ser aplicada a erros associados a projeto ou erros operacionais (por exemplo, um equipamento pode possuir um desempenho dentro do esperado de acordo com o planejado, porém o desempenho não é suficiente para que um problema não ocorra – isso caracterizaria um erro de projeto).

O diagrama de causa e efeito é uma ferramenta utilizada para levantar as variações ou principais causas de um problema, analisando todos ou o maior número possível de fatores envolvidos com o uso do processo. Dessa forma, o seu propósito é apontar os principais fatores que levam uma organização a enfrentar certas adversidades. De acordo com Cauchik (2011) e Huevel et al. (2008), este estudo consiste em, através de um

diagrama organizado logicamente, determinar como uma anomalia ou falha em um sistema pode ser causada por uma falha e/ou uma combinação de falhas de seus componentes e conjuntos.

Segundo Cauchick (2011) os passos para desenvolver a análise são: Iniciar a análise a partir do problema, denominado “evento de topo”. De acordo com as referências do processo este é definido como um estado considerado anormal do sistema, causado por fatos normais ou não. A seguir, para o evento de topo, deve-se determinar quais seriam os eventos ou modos de falhas que em conjunto ou separadamente causaram a falha. Enfim determinar ou priorizar os eventos da etapa anterior que em conjunto ou separadamente causaram as falhas. Recomenda-se repetir sucessivamente este passo até que se chegue aos eventos relacionados a falhas básicas.

Huevel et al. (2008) comenta que ao serem formados os ramos ou braços das árvores, as causas que vão sendo atribuídas devem ser verificadas, testadas e comprovadas através de evidências. Caso algum ramo não possa ser evidenciado com dados, este pode ser despriorizado. Quando os eventos associados a falhas básicas são encontrados, testados e comprovados entende-se que chegou ao final da análise.

2.1.3 Conclusões

Nesta etapa liste as descobertas e causas estabelecidas na investigação, como consequência da análise deve-se apresentar a causa raiz mapeada e as causas contribuintes ou relacionadas para que o problema seja devidamente tratado. A lista de causas deve incluir tanto as imediatas quanto as causas sistêmicas mais profundas.

Nesta etapa pode-se incluir também recomendações gerais que possam contribuir para a mitigação da causa raiz e das causas contribuintes identificadas no estudo, entre elas falhas de processo, envolvendo pessoas, organizacionais, estratégicas, entre outras.

2.1.4 Recomendações de segurança

Como produto de todo o trabalho na metodologia indicada pela OACI nesta etapa deve-se descrever brevemente quaisquer recomendações feitas para prevenção de acidentes e quaisquer ações corretivas resultantes.

2.2 Análise de falha aplicada a parafusos

Como indicado no “ASM Metal Handbook” para verificar os modos de fratura e seus mecanismos deve-se identificar a origem da fratura e o(s) mecanismo(s) de propagação de fissuras. Em geral, os três “modos” ou tipos gerais de fratura metálica incluem falhas por sobrecarga, fadiga e fluência. Em geral, o crescimento ou propagação de fissuras durante uma a fratura por sobrecarga é mais rápida do que as formas mais progressivas de fissuração devido à fadiga ou fluência. Portanto, para distingui-lo da forma mais progressiva de fissuração devido à fadiga ou fluência a sobrecarga é descrita como “instantâneo”. Esses modos básicos de fratura também podem ocorrer em combinação, como quando uma trinca por fadiga ou por fluência cresce ao longo do tempo e, por fim, leva a uma fratura rápida através de falha por sobrecarga por fissuração dúctil e/ou frágil.

Ribeiro (1996, p.) cita um exemplo de protocolo de teste para uma falha de menor importância econômica, que podemos seguir para nosso estudo.

- Inspeção visual e fotografia da máquina e arredores, eixo em questão e peças correspondentes para determinar o ambiente geral e a condição da máquina; determinar se a trinca foi causada por um ou mais ciclos de carga, procurar evidências de danos por calor ou corrosão; encontrar a(s) origem(s) da rachadura. Para verificar superfície de fratura recomenda-se a verificação visual, com aumento de 1 para 50x, e o escaneamento microscópico de elétrons, com aumento de 20 a 10000x,

- Proteja e coloque adequadamente os componentes em questão em uma área protegida para evitar a destruição de evidências

- Inspeção mais detalhada da peça quebrada. Seleção de locais de teste para confirmar se a trinca foi causada por um ou mais ciclos de carga; procure evidências mais sutis de danos por calor ou corrosão; encontrar a(s) origem(s) da fissura; tire fotos melhores do que seria possível fora do laboratório; permitir que a investigação prossiga

- Testes ultrassônicos para documentar a presença ou ausência e tamanho e orientação de trincas secundárias

- Corte amostras para fornecer pequenas amostras para testes destrutivos

- Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para procurar evidências de caminhos de trincas usuais ou incomuns, imperfeições de fabricação ou danos de serviço. Para verificar a sessão cortada recomenda-se uma inspeção metalográfica, com aumento de 50 para 1000x.

- Metalografia óptica para determinar se a microestrutura é consistente com as expectativas com base nas evidências do caminho da fissura
- Testes de dureza ou micro-indentação para determinar se os valores de dureza são consistentes com a microestrutura aparente
- Verificação da composição para confirmar que a liga adequada é usada
- Teste de tração para confirmar se as propriedades mecânicas estão dentro das faixas esperadas

Danielle Lima de Figueiredo (2019) no artigo Gestão de Manutenção: Metodologias e Ferramentas para análise de falhas apresenta a metodologia de árvore de falhas como suporte para o desenvolvimento de estratégias no sentido de minimizar falhas na produção de produtos, e obter melhor resultado no processo para fabricação. Figueiredo (2019) conclui que com essa ferramenta é possível melhorar o processo preventivo, com base na causa de falhas e em seguida orienta para ações mais assertivas.

Vicente (2021) relata no artigo Análise de Falhas em grampos ferroviários tipo Fastclip a necessidade de priorizar algumas análises no processo de investigação, dentre elas o exame visual e fotográfico das amostras dos grampos de fixação selecionados para o estudo, com posterior análise micrografia, avaliação de composição química e realização de teste de dureza. Com essas análises o objetivo de fazer a caracterização das falhas e identificação de possíveis causas foi possível. Observou-se que as falhas em grampos são geralmente devido a fadiga pois são submetidos a carregamentos cíclicos oriundo do tráfego ferroviário nas vias. Além disso observou-se pontos de concentração de tensão. Com tudo se conclui que o material aplicado estava adequado ao uso.

2.2.1 Mecanismos de falhas de parafusos

Parte do trabalho considera uma análise de falha realizada em parafusos os quais fazem parte do conjunto de fixação de sapatas em esteiras no equipamento alimentador de sapatas.

Segundo Buda (1994) os parafusos na maioria das vezes falham devido a uma entre quatro causas a seguir: sobrecarga, fadiga, corrosão e fragilidade. O que é reforçado por Nishida (1992), que descreve que a grande maioria das falhas de parafusos que ocorrem em serviço são por fadiga. Do número total de falhas, as por fadiga estão de 50

a 90%, sendo que na maioria das vezes as falhas ocorrem de forma não esperada (ROSA, 2002).

A falha por fadiga ocorre geralmente em três etapas: A primeira etapa consiste na nucleação da trinca. Esta ocorre normalmente a partir da superfície do material, e pode ocorrer a partir de intrusões e extrusões causadas por tensões de cisalhamento presentes junto aos planos/superfícies de deslizamento de cada material. Em geral o início das trincas de fadiga está correlacionada a defeitos superficiais ou variações geométricas provenientes da fabricação das peças. Atuam como concentradores de tensão. No segundo estágio, ocorre a propagação da trinca pelo componente gerando marcas microscópicas a cada ciclo de fadiga sofrido, denominadas “marcas de praia”. No terceiro estágio ocorre a fratura do componente onde a seção transversal do componente já não é mais suficiente para resistir aos esforços aplicados entrando então em colapso de forma catastrófica (REGULY et al., 2010).

Paulo M.S.T. de Castro (2004) no artigo “Methodologies for failure analysis: a critical survey” apresenta que as superfícies de fratura são extremamente delicadas e dela é possível obter informações relevantes para a análise de falhas. Os corpos de prova ou evidências devem ser preservados com cuidado. As partes não devem ser montadas pois isso danificará as superfícies e prejudicará o exame da fratura. Hipóteses preliminares são feitas e testadas usando como experimentos e cálculos necessários. A aparência macro e micro da falha coletada no teste deve ser comparado com a peça real da falha. A análise de tensão eventualmente pode ser realizada.

No artigo “Análise de falha em parafusos utilizados em equipamento de moagem de minério, cujos autores estão descritos na revisão bibliográfica, apresentam os resultados de análise de falha realizada em parafusos os quais fazem parte do conjunto de um moinho utilizado na moagem de minério. Nesta análise foi realizado análise fractográfica onde as superfícies de fratura foram analisadas após serem submetidas à uma limpeza prévia com acetona e ultrassom. As imagens da Figura 6 são macrografias obtidas em câmera digital que mostram as superfícies de fratura das amostras “A” e “B”, como recebidas. A amostra apresentou fratura com oxidações superficiais indicando características de falha por fadiga, com vários ”pontos” de início das trincas de fadiga, localizados junto à superfície externa da peça e no fundo do filete. Esses pontos estão indicados pelas setas nas Figuras 7 e 8. As imagens das Figuras 7 e 8 são imagens obtidas

em câmera digital que evidenciam as regiões de início da falha e também a região da fratura final, região da sobrecarga, das amostras “A” e “B”, respectivamente. A Figura 9 apresenta imagens em lupa de baixo aumento que mostram às superfícies de fratura das amostras “A” e “B”, próximas as regiões de início da falha.

Figura 6 - Imagem da superfície de fratura dos dois componentes “A” e “B”.



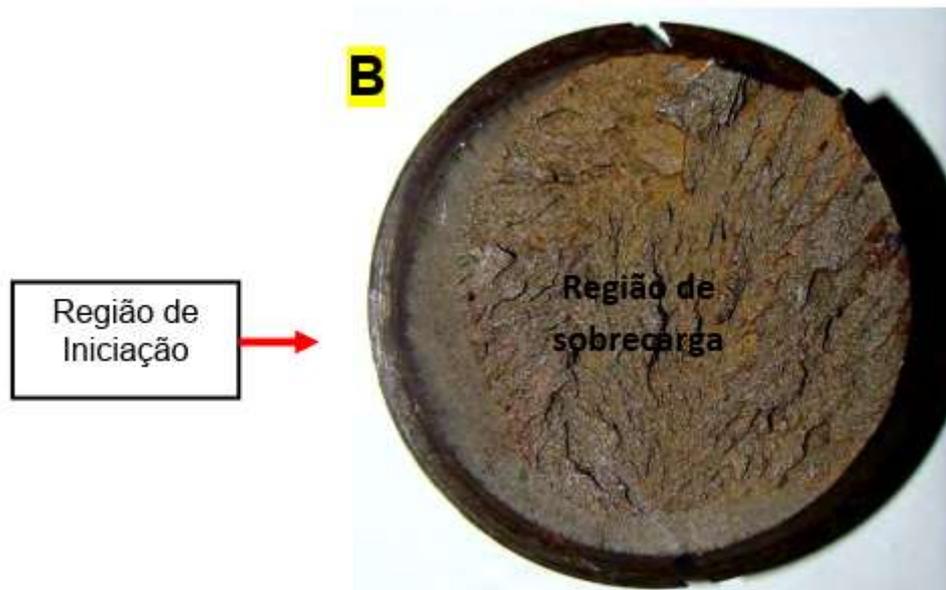
Fonte: O autor.

Figura 7 - Imagem da superfície de fratura da amostra “A”, indicando a região de início da falha



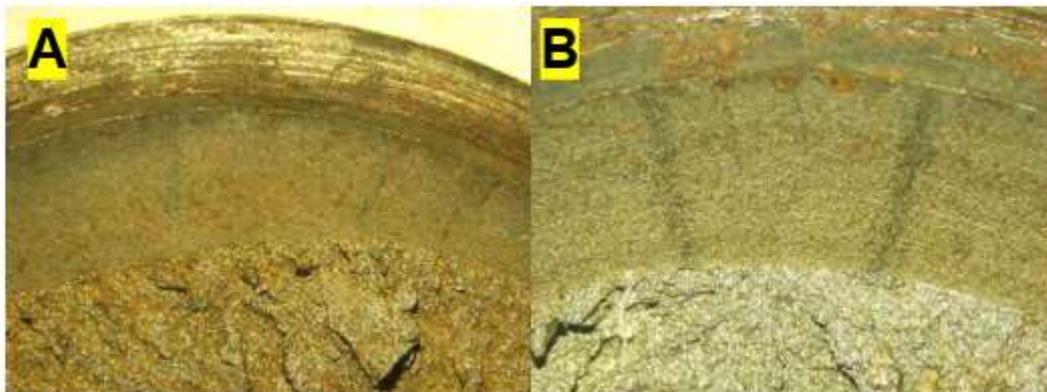
Fonte: O autor.

Figura 8 - Imagem da superfície de fratura da amostra “B”, indicando a região de início da falha.



Fonte: O autor.

Figura 9 - Imagens em lupa de baixo aumento mostrando a superfície de fratura das amostras “A” e “B” próxima a região de início da falha.



Fonte: O autor.

Giordani et al. (2013) concluíram que através da análise da superfície de fratura pode-se verificar que ambos os parafusos indicaram características de falha por fadiga, com vários “pontos” de início das trincas de fadiga, localizados junto à superfície externa da peça e na região do fundo do filete. Estas regiões atuam como concentradores de tensões, estimulando a falha prematura do componente.

González, Muro e García-Martínez (2022), também avaliaram a causa raiz de fratura de parafuso. O conjunto fraturado foi formado por um parafuso e uma porca autotravante acastelada. Geralmente, a função dos elementos de união é transmitir cargas

de uma peça para outra, e evitar sua separação sob a ação de forças paralelas ao eixo do elemento de união. Estes elementos podem ser montados e desmontados, exceto a porca autotravante, que apresenta um número limitado de operações.

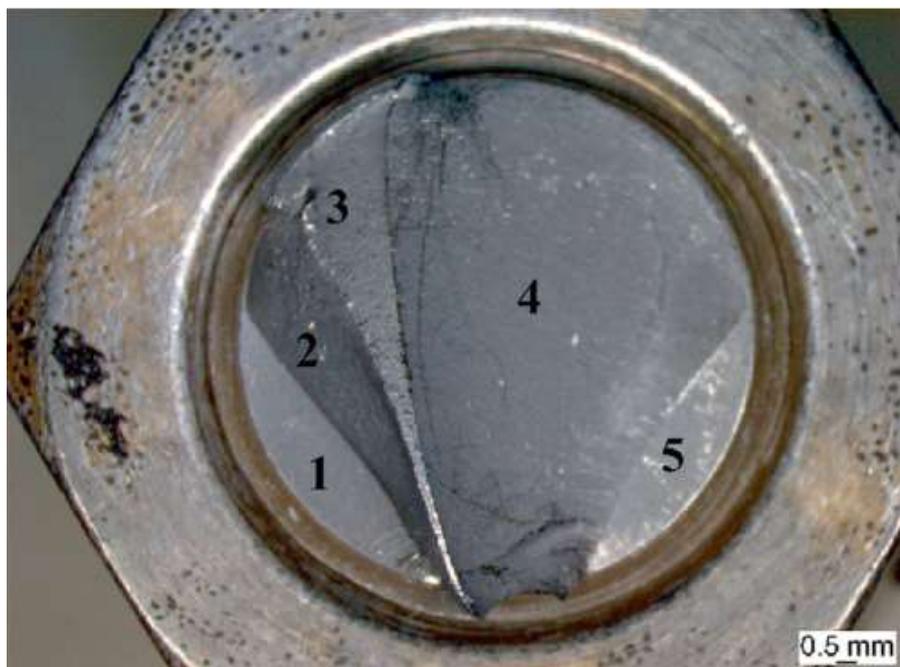
A superfície de fratura, rotulada como A na Figura 10, foi inspecionada e cinco zonas foram selecionadas e mostradas na Figura 11.

Figura 10 – Superfície de fratura do parafuso



Fonte: González, Muro e García-Martínez (2022).

Figura 11 – Vista frontal da superfície de fratura da imagem A com marcações



Fonte: González, Muro e García-Martínez (2022).

Nenhuma deformação plástica foi observada nas zonas 1 e 5, assim como estava presente nas zonas 2, 3 e 4. A superfície de fratura apresentou-se brilhante e clivada em todas as zonas, exceto na zona 3, que era mais fibrosa.

Como pode ser observado na Figura 11, as zonas 1 e 5 estavam localizadas na base formando 90° com o eixo do parafuso na penúltima rosca. A zona 2 formava um ângulo de aproximadamente 30° com o eixo e a zona 4 localizava-se a 60° da zona 2.

Considerando a sua morfologia, existiam duas frentes progressivas de propagação, com origem situadas respectivamente nas zonas 1 e 5, crescendo ao longo das zonas 2 e 4, e unindo ambas as fraturas na zona 3. A zona 2 era consideravelmente menor que a zona 4, que preenchia a maior parte da seção do parafuso.

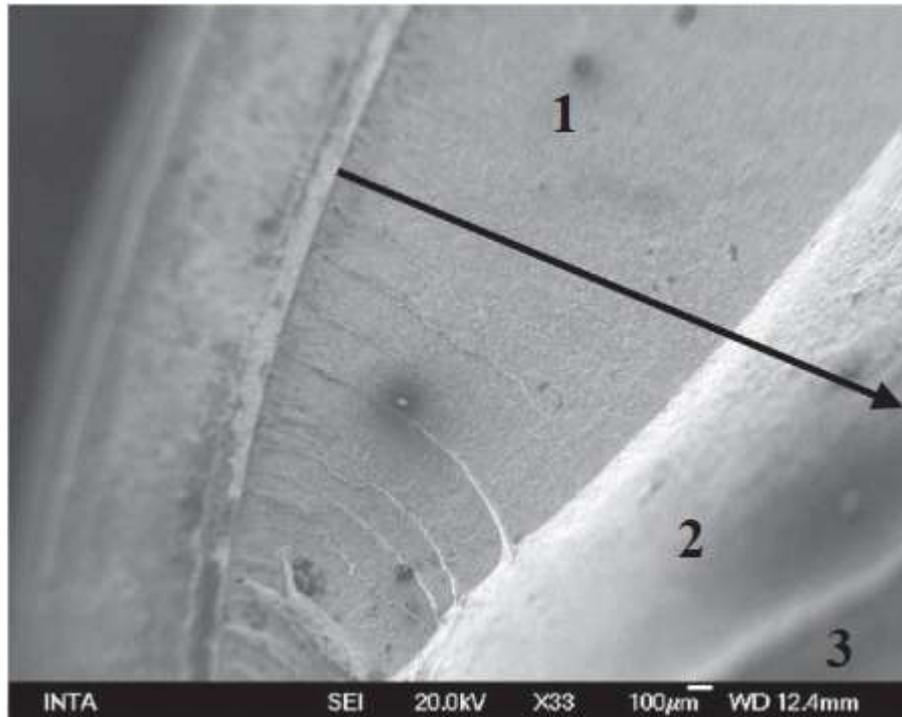
Neste caso o artigo conclui que em relação à superfície de fratura, esta pode corresponder a uma fratura por fadiga por flexão bilateral com sua origem localizada na raiz da última rosca do parafuso.

Em seguida os autores realizaram análise micrográfica, onde a superfície de fratura “A” foi inspecionada seguindo a linha de observação mostrada na Figura 12. O perímetro externo da Zona 1, mencionado acima, foi intensamente analisado para localizar a possível origem da fratura, mas nenhuma origem clara foi observada, Figura 13.

A fratura apresentou características típicas de fratura por fadiga progressiva neste tipo de aço. Foram observadas plataformas microfissuradas relacionadas a estrias, Fig. 6c, e algumas estrias foram mostradas na Fig. Na zona de transição, entre as zonas 1 e 2, foram observados alguns microvazios, Fig. 6e, bem como na Fig. 6f, onde foi mostrada uma zona de vazios correspondente à zona 3. A Zona 3 foi a área de fratura final onde ocorreu uma sobrecarga estática. fratura foi produzida.

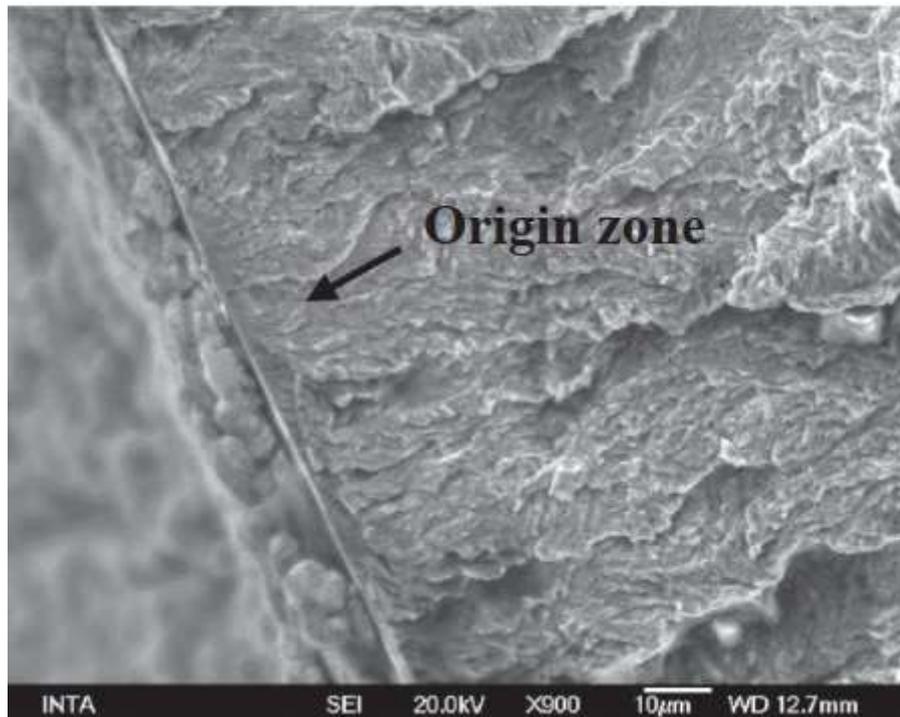
Características semelhantes foram encontradas na zona 5, onde estava localizada a outra origem da fratura. Todas estas características mencionadas acima eram as esperadas de uma fratura progressiva por fadiga neste tipo de aço. Na zona de propagação da fratura ocorreram estrias dúcteis e na zona final onde foi produzida uma sobrecarga estática foram observados vazios.

Figura 12 – Zona A da superfície de fratura. A linha de propagação da trinca.



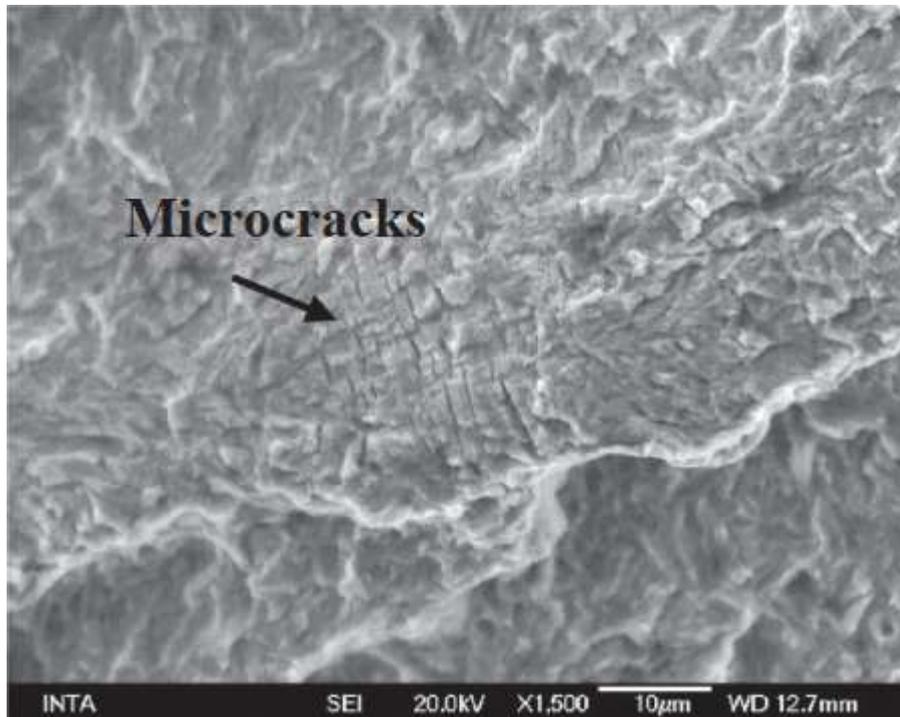
Fonte: González, Muro e García-Martínez (2022).

Figura 13 – Origem da Fratura



Fonte: González, Muro e García-Martínez (2022).

14 – Microfraturas relacionadas a estrias de fadiga.



Fonte: González, Muro e García-Martínez (2022).

3 METODOLOGIA

3.1 Análise de falha e verificação dos parafusos

Nesta etapa será apresentado o desenvolvimento do trabalho de análise de falhas de quebras de parafusos de fixação de Alimentadores de Sapatas na usina de beneficiamento de minério de ferro de Serra Leste, em Curionópolis no Pará. Inicialmente foram coletados diversos parafusos fraturados e amostras de parafusos novos, sem uso. Os parafusos empregados eram de dois fabricantes e ambos os parafusos estavam falhando. Para identificação, os parafusos serão nomeados de CAT e de ARS. Na Figura 15 e na Figura 16 são apresentados alguns parafusos fraturados que foram coletados.

Figura 15 - Foto da superfície da fratura do parafuso



Fonte: O autor.

Figura 16 - Fotos de várias superfícies de parafusos fraturadas

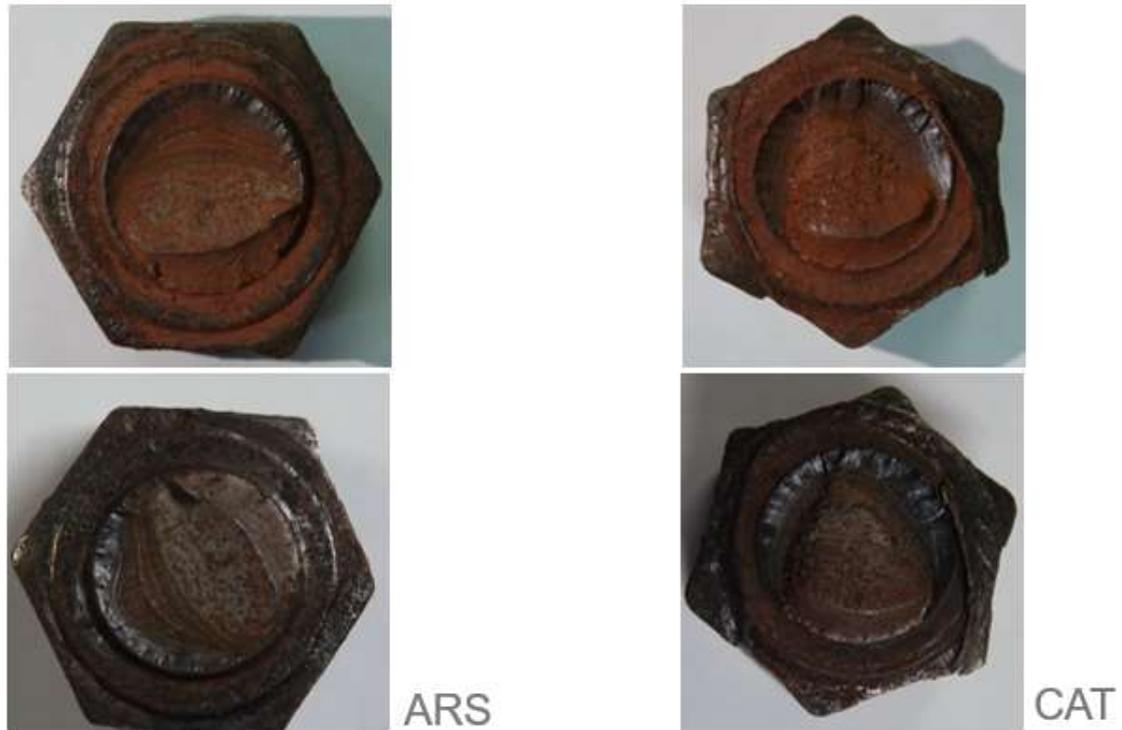


Fonte: O autor.

Parafusos fraturados, de ambos os fabricantes, foram então submetidos as seguintes análises laboratoriais: fractografia em lupa de baixo aumento e em microscópio eletrônico de varredura (MEV), análise metalográfica, perfil de microdureza e análise química.

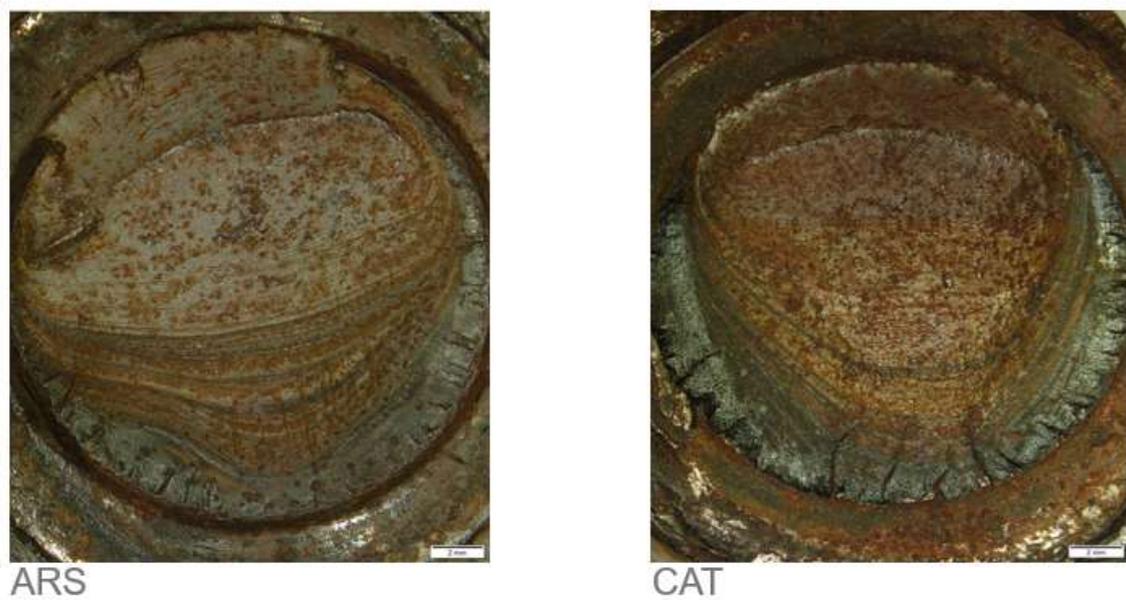
As amostras foram inicialmente limpas em banho ultrassônico de álcool para remoção de resíduos aderidos a superfícies de fratura das amostras como mostra a Figura 17. Posteriormente, as superfícies de fratura foram analisadas em lupa estereoscópica (7x) para identificação dos mecanismos envolvidos na falha, como na Figura 10.

Figura 17 - Parafusos fraturados limpos modelo ARS e CAT



Fonte: O autor.

Figura 18 - Superfícies fraturadas aumentadas em 7x



Fonte: O autor.

A análise química dos parafusos foi realizada via combustão para obtenção dos teores de C e S e em espectrômetro de emissão óptica para a determinação dos demais elementos químicos. Para análise microestrutural, foi realizado um corte conforme indicado na Figura 18. Posteriormente as amostras foram embutidas em baquelite, lixadas até lixa #1200 e então polidas com suspensão de diamantes de até 1 μm , como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Posição de corte da amostra do parafuso
ARS e CAT



Fonte: O autor.

Figura 20 - Amostra preparada em baquelite



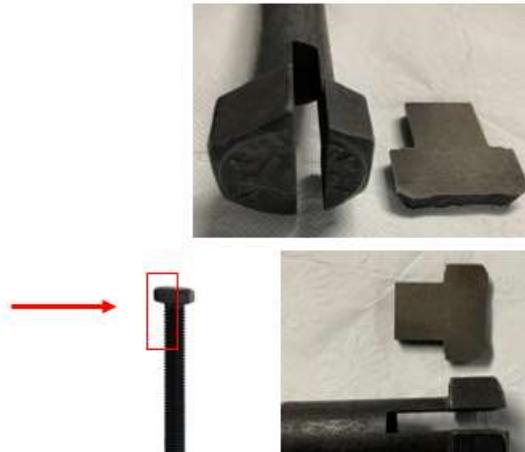
Fonte: O autor.

Medições de dureza foram realizadas na sessão transversal, conforme mostrado na Figura 19. Posteriormente as amostras foram embutidas em baquelite, lixadas até lixa #1200 e então polidas com suspensão de diamantes de até 1 μm , como mostra a Figura

20. Para as medições de dureza foi empregado o método Vickers HV10 (força de ensaio de 10 kgf) 20 segundos, utilizando Durômetro Vickers Mitutoyo HV-100.

Figura 21 - Corte da amostra no sentido transversal

ARS e CAT



Fonte: O autor.

Figura 22 - Amostra de corte transversal em baquelite



Fonte: O autor.

Ensaio de tração foram realizados em amostras de parafusos novos, utilizando máquina Instron 2382 (100 kN capacidade), com controle de deslocamento, 0,5 mm/min até o escoamento, 8,0 mm/min até a fratura, comprimento $L_0=4D$, e geometria e dimensões dos corpos de prova de acordo com norma ASTM E8/E8M-21a.

Figura 23 - Amostras para o ensaio de tração



Fonte: O autor.

3.1 Identificação da causa raiz e ações de manutenção

Após indentificado os mecanismos de falha do parafusos, foram levantas hipóteses para a identificação causa raiz do problema. Para isso, foi inicialmente foi realizada um diagrama de Ishikawa (espinha de peixe). Para elaboração do diagrama foram pontuadas algumas causas prováveis para a quebra de parafusos de fixação da sapata do AL-1210KL-01, levando em considerações hipóteses que são coerentes com os modos de falha encontrados na análise de falha dos parafusos. A causas foram divididas em prováveis, destacadas em vermelho no diagrama, e contribuintes, destacadas em verde no diagrama. A elaboração do diagrama foi realizada por equipe multidisciplinar.

Adicionalmente, foi elaborado um plano de ações para que as causas prováveis sejam melhor investigadas, as hipóteses testadas e comprovadas. Por fim, foi criada uma arvore de falha, possibilitando identificar quais hipóteses serão tratadas na intervenção de manutenção.

Antes da intervenção de manutenção, foi feito uma análise da maturidade da parada, com base em um documento desenvolvido pela Vale, onde existe um formulário

com diversas perguntas que, com base em conhecimentos empíricos, entende-se que são importantes de serem consideradas na etapa de planejamento de paradas de manutenção. O formulário utilizado está apresentado no anexo A.

A ferramenta de avaliação foi preenchida e calibrada por um grupo multidisciplinar composto de pessoas envolvidas na parada de manutenção, que atribui pesos para cada questão de acordo com seu impacto para a gestão da parada, a priorização ou grau de importância daquele tópico, podendo ser estes revisados periodicamente para melhor se ajustarem à realidade do momento. Os pesos seguirão a seguinte métrica exposta na Figura 24.

Figura 24 - Métrica para aplicação de pesos

Peso	Impacto	Definição
1	Pequeno	Pequeno impacto na duração e/ou segurança da parada que pode ser facilmente gerenciado no momento em que ocorrer.
3	Moderado	Impacto moderado na duração e/ou segurança da parada que requer recursos para ser resolvido, mas não coloca o Business Case e a integridade das pessoas em risco.
5	Grande	Grande impacto na duração e/ou segurança da parada que afeta o Business Case, aumenta a exposição a riscos e requer recursos internos e externos significativos.
8	Crítico	Impacto crítico na duração de parada, continuidade operacional e/ou em suas condições de segurança e exposição a riscos, o que significa que o Business Case não será atendido.

Fonte: O autor.

Antes do preenchimento do questionário, deve-se ser indicada a última fase que será avaliada, dessa forma os resultados sairão proporcionais às fases avaliadas, como na Figura 25.

Figura 25 - Descrição das fases de planejamento da parada de manutenção



Fonte: O autor.

Com a ferramenta do questionário calibrada e com seus pesos definidos, parte-se para a avaliação das questões em campo de acordo com a realidade observada na parada, que deverá ocorrer ao final de cada fase. Além da resposta objetiva para as perguntas, é necessário que o seu resultado seja classificado conforme a métrica disposta na Figura 26. As notas atribuídas devem ser sustentadas por evidências que, por sua vez, deverão estar disponíveis no gerenciamento da documentação da parada.

Figura 26 - Régua de maturidade

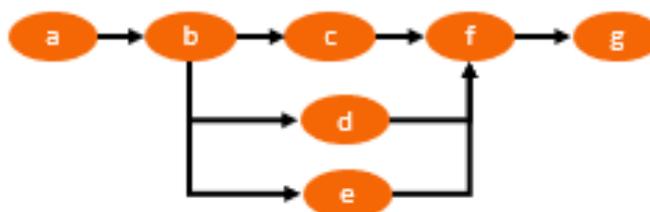
Maturidade	0	1	2	3	4
Cultura	Reativa	Reativa	Dependente	Independente	Interdependente
Processos	Inexistentes	Pontuais / Instáveis	Em implantação / Instáveis	Implantados / Estáveis	Sistematizados / Estáveis
Resultados	Sem referências	Abaixo da meta	Instáveis	Alcançando a meta	Melhorados continuamente
Conformidade	Nenhum esforço foi iniciado neste sentido	Esforços foram iniciados neste sentido. Práticas em estágio embrionário.	A estrutura de controle requer melhorias significativas para atingir um nível apropriado. Apresenta evidências consistentes de uma parte dos requisitos.	Item em total conformidade. Apresenta evidências consistentes para a maior parte dos requisitos.	Item implantado com excelência. As práticas superam as expectativas.

Fonte: O autor.

Também foi realizada simulação estatística de Monte Carlo para medir a probabilidade de execução da pauta prevista do caminho crítico definido para a parada manutenção no prazo planejado. Esta etapa foi subdividida nas seguintes fases.

- 1 - Elaborar diagrama de precedência, como na Figura 27.
- 2 - Estimar durações mínima e máxima para cada atividade
- 3 - Gerar valores aleatórios para 10.000 cenários
- 4 - Avaliar os resultados da simulação

Figura 27 - Diagrama de precedência da parada



Fonte: O autor.

Com base nas informações coletadas e mensuradas, será possível embasar tecnicamente de modo a orientar as equipes de planejamento e execução de manutenção quanto a aptidão ou não para a realização da parada de manutenção, sinalizando e orientando com medidas a serem tomadas para os gargalos e pontos críticos, de forma que seja aumentada a probabilidade de cumprimento de todo o escopo previsto, com qualidade, dentro do prazo definido e com segurança.

Após a intervenção, foi então criada uma rotina de acompanhamento e registro de falhas, medição de eficácia, para validação das ações tomadas.

4 RESULTADOS

Na Figura 28 estão apresentadas as superfícies de fratura das amostras de parafusos que falharam em serviço. As superfícies foram analisadas em lupa estereoscópica para identificação dos mecanismos de fratura.

Figura 28 - Superfície de fratura com indicação de "marcas de praia"



Fonte: O autor.

Com base nas superfícies de fraturas mostradas na Figura 28 e análises é possível constatar que existiu um processo progressivo e localizado de modificações estruturais permanentes ocorridas no material submetido a condições que produzam tensões e deformações cíclicas que pode culminar em trincas ou fratura após um certo número de ciclos, ou seja, nas imagens acima percebe-se que os parafusos sofreram esforços repetidos e microdeformações plásticas, representadas pelas marcas de praia (destacadas pelas setas vermelhas), o que se caracteriza um processo de fadiga e que culminaram numa fratura frágil, processo esse representado na Figura 29.

Figura 29 – Processo de evolução da falha para a fratura



Fonte: O autor.

ANÁLISE QUÍMICA

Em seguida as amostras foram submetidas à análise química, onde foi possível verificar as diferenças de composição dos parafusos e compará-los, como apresentado na Tabela 1. Observa-se que a amostra ARS A490 tem composição química similar a uma 4130 e a amostra da CAT se aproxima de um aço 1030 com uma pequena adição de Cr e Mo, o que reforça a utilização do parafuso conforme projeto já que o aço 4130 apresenta uma melhor combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura, além de elevada resistência à fadiga quando comparado ao aço 1030

Tabela 1. Análise química dos parafusos
Análise química (% em peso)

Identificação	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	Cu	Fe
ARS A 490	0,32	0,20	0,84	0,006	0,005	0,98	1,74	0,27	0,054	0,002	0,02	0,13	Bal
CAT LE	0,32	0,23	0,92	0,008	0,011	0,19	0,04	0,12	0,002	0,026	0,02	0,10	Bal

NE - Não especificado, ND - Não detectado, NA - Não analisado

Fonte: O autor.

Além da composição química é importante verificar que o tamanho da cabeça do parafuso ARS é maior que a do CAT o que garante uma maior área de contato no conjunto peça e parafusos e, conseqüentemente, maior força de atrito entre elas, sendo assim uma menor probabilidade do conjunto perder a fixação. Com isso, destaca-se que o parafuso especificado no projeto do equipamento é mais indicado para a aplicação, reforçando que é importante não substituir componentes originais do projeto sem antes fazer uma correta avaliação dos impactos que a mudança pode causar. Como oportunidade de melhoria de fixação do conjunto recomendamos o uso de porcas autotravantes.

ANÁLISE METALOGRAFICA

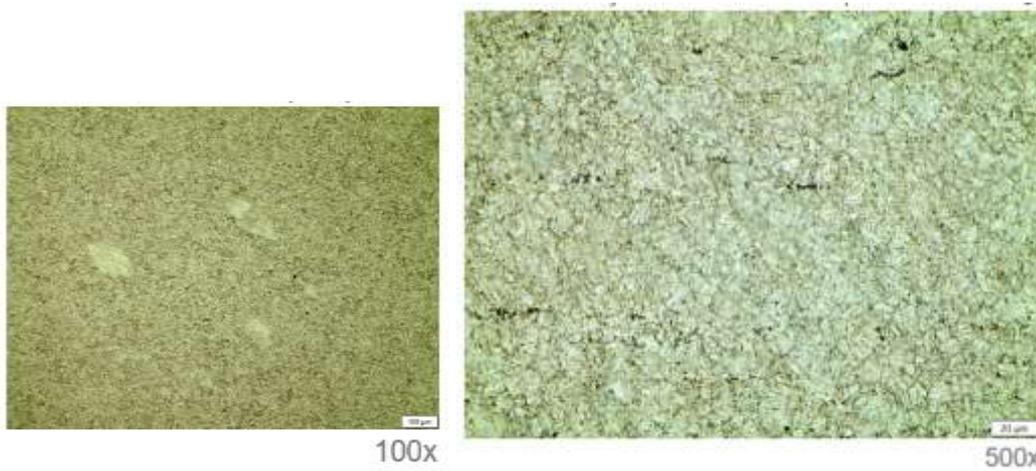
Na Figura 30 e na Figura 31 são apresentadas as microestruturas obtidas em microscópio óptico para as amostras de parafuso ARS e CAT, respectivamente. Ambas

as amostras apresentaram microestrutura predominantemente martensítica, com presença de inclusões e porosidades.

Figura 30 - Microestrutura da amostra ARS analisada em microscópio óptico.

Metalografia

Amostra ARS sob ataque químico Nital 2% - Seção horizontal do corpo

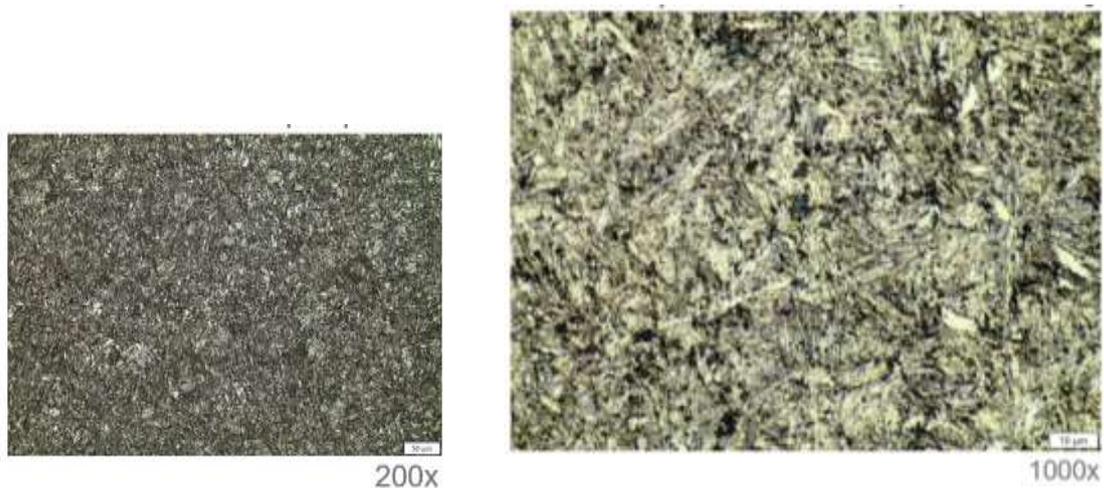
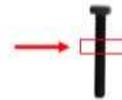


Fonte: O autor.

Figura 31 - Microestrutura da amostra CAT analisada em microscópio óptico.

Metalografia

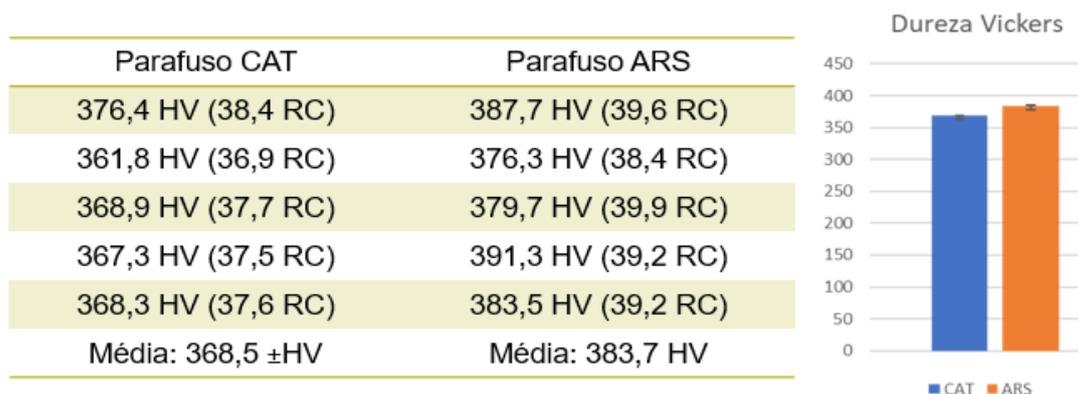
Amostra CAT sob ataque químico Nital 2% - Seção horizontal do corpo



Fonte: O autor.

Na Tabela 02 são apresentados os resultados de dureza dos parafusos sendo possível observar que a dureza dos parafusos são muito próximas sendo que o parafusos ARS (383,7 HV) apresentaram dureza superior em relação ao CAT (368,5 HV).

Tabela 2 - Resultados da medição de dureza dos parafusos



Fonte: O autor.

Complementar ao estudo em questão foi efetuada a caracterização mecânica do material, consistindo em ensaios de tração nos parafusos de fixação do alimentador de sapatas, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados dos testes de tração dos parafusos

Identificação Cliente	IS _e (MPa)	S _r (MPa)	A (%)	RA (%)
Parafuso ARS A 490	1099,6	1139,2	16,9	64,1
	1080,1	1120,8	16,7	62,5
Média	1089,9	1130	16,8	63,3
Parafuso CAT LE	1162,3	1201,6	20,8	69,3
	1148,2	1194,4	19,5	68,3
Média	1155,3	1198,0	20,2	68,8

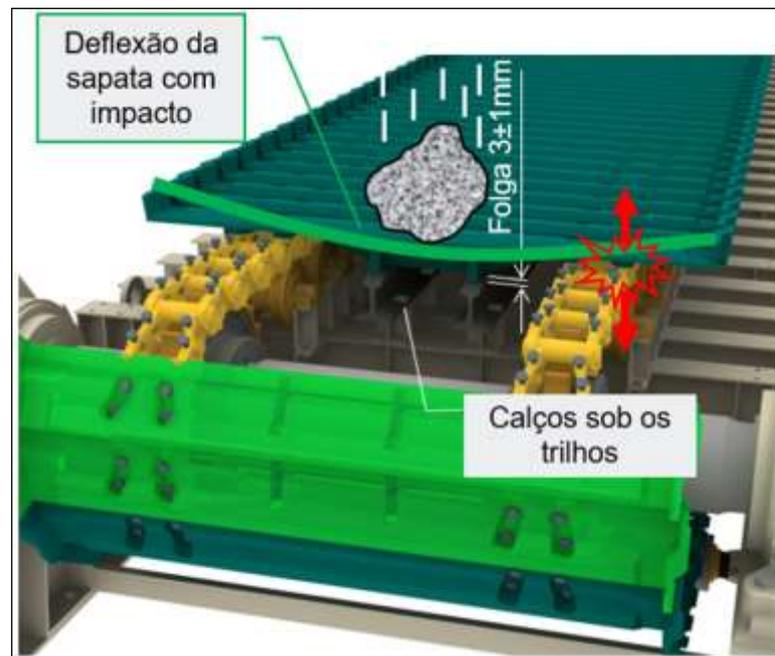
Legenda: Se = limite de escoamento 0,2% offset, Sr = limite de resistência à tração, A = alongamento em 4D=24 mm, RA = redução de área

Fonte: O autor.

Com isso é possível certificar que os parafusos CAT têm limite de escoamento, limite de resistência a tração, alongamento e redução de área ligeiramente maiores que os parafusos ARS, diferença essa que não deve desclassificar a aplicação dos parafusos de valores menores já que a variação é pouco representativa. Como o manual do fabricante especifica os parafusos ARS, foi adotada a premissa de que o dimensionamento dos mesmos está correto e que os parafusos CAT, por possuírem propriedades compatíveis, também estão de acordo com o requerido. Neste trabalho, não foi realizada a verificação de esforços impostos aos parafusos, para verificação se eles estão corretamente dimensionados, devido à complexidade dessas análises e devido ao fato de existirem desvios a serem tratados que elevam os esforços submetidos aos parafusos. Porém, não foi descartada a realização dessas análises de esforços e validação da especificação dos parafusos, caso as ações que serão apresentadas a seguir não sejam satisfatórias.

No entanto as informações coletadas durante análises laboratoriais dos parafusos foram contribuintes para reforçar a hipótese de danos nos parafusos, devido à esforços excessivos durante a operação, tendo em vista que os parafusos possuem as propriedades requeridas pelo projeto do equipamento. Uma hipótese é que o esforço excessivo ocorra devido a flexão das sapatas do equipamento, como mostrado na Figura 32.

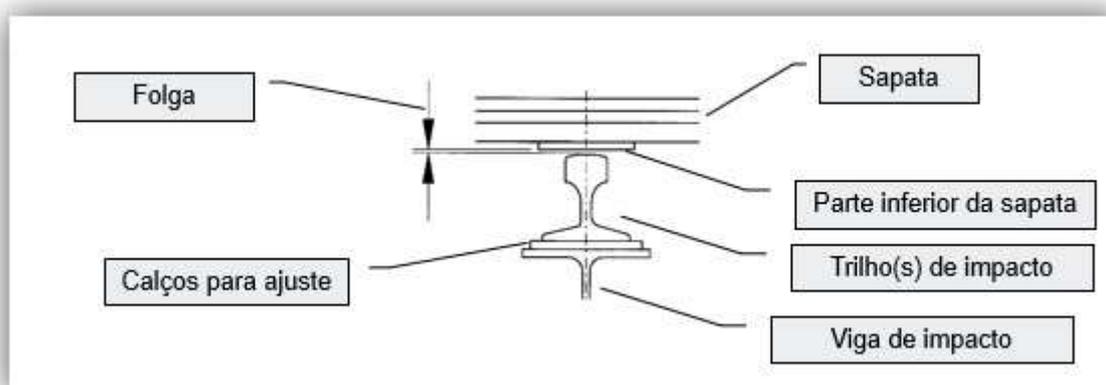
Figura 32 - Representação da flexão nas sapatas por conta de impacto



Fonte: Manual da Metso.

A Figura 33 é apresentada uma representação esquemática da região em que ocorre a folga. Um valor máximo de folga (folga ideal) que deve existir entre as esteiras do alimentador de sapatas e a estrutura do equipamento foi então estabelecido e com isso controles para garantir o mesmo também foram propostos. A folga máxima permitida proposta foi de 3 mm. O valor foi tomado com base em outros equipamentos e a partir dessa proposição será controlado e verificado com frequência, de modo a validar a efetividade da ação.

Figura 33 - Detalhamento da folga entre a sapata e o trilho do AL



Fonte: Manual da Metso.

Uma importante ação para minimizar a flexão das sapatas é de evitar que alguma sapata fique desnivelada das outras, limitar a amplitude de flexão das sapatas e, principiante, evitar queda de material diretamente nas sapatas do AL, ou seja, manter uma camada de material no alimentador, evitando que o impacto entre o material da alimentação toque diretamente as sapatas, como mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Camada de material para amortecer impacto sobre o AL



Fonte: Manual da Metso.

Com isso algumas novas medidas foram propostas e implementadas:

Foi verificada a lógica de intertravamento para nível mínimo da moega de alimentação do AL. Atualmente existe um intertravamento de nível de silo em 20% para o AL, ou seja, o silo que alimenta a sapata terá sempre material, no mínimo 20% de sua capacidade

Foram verificadas a eficiência nos sistemas protetivos do AL, quanto a Lógica de intertravamento para sobrecarga no acionamento do AL e foram realizadas algumas verificações iniciais de forma a garantir um sistema mais efetivo e que pudesse proteger o conjunto de grandes esforços, como ocorreu com uma sapata que se travou na estrutura e o acionamento continuou atuando, gerando empenamento na estrutura do carro tensor e a quebra da roda guia.

Porém, mesmo assim, ainda não foram encontradas evidências suficientes para comprovar a causa raiz, sendo assim foi elaborado um plano de ações para que as causas prováveis sejam melhor investigadas, as hipóteses testadas e comprovadas e então investigar mais a fundo a causa raiz e propor soluções mais assertivas.

4.1 Verificação de hipóteses

Nesta etapa as hipóteses levantadas no gráfico de Ishikawa, Figura 35, começaram a ser verificadas, as que estavam divergentes foram tratadas, em alguns casos foram corrigidas, com exceção das tarefas de grande complexidade que não foram realizadas devido à complexidade, recursos necessários não disponíveis e a limitação de tempo disponível nas paradas de rotina.

Figura 35 - Gráfico de Ishikawa



Fonte: O autor.

A seguir apresenta-se as verificações contidas no Ishikawa, Figura 35:

1.1 – Falta de PRO específico para a atividade de substituição do AL.

A figura 36 apresenta o procedimento elaborado com orientações para a substituição do alimentador de sapatas.

Figura 36 - Procedimento de substituição do AL

SUBSTITUIR ALIMENTADOR DE SAPATA SL



PRO-039658, Rev.: 01 08/11/2022

+

Diretoria Emitente: Diretoria Corredor Norte.
 Responsável Técnico: Jolivan Batista Leite Matrícula: 01524104,
 Área: Gerência de Manutenção Usina Serra Leste.
 Público-alvo: Téc. De Manutenção, Mecânicos, soldadores, Caldeireiros, Trainee e Jovem Aprendiz da Vale e empresas contratadas na Gerência de Manutenção Serra Leste.
 Necessidade de Treinamento: SIM (X)NÃO
 Tarefa prioritária: SIM (X)NÃO

Resultados Esperados: Proporcionar segurança e conhecimento do processo de manutenção para os colaboradores envolvidos no processo de manutenção do alimentador

Fonte: O autor.

No procedimento constam as etapas para a substituição do alimentador de sapatas, inclusive com as tarefas detalhando a fixação das sapatas nas esteiras com parafusos, como descrito a seguir:

– Montar parafusos de fixação conforme especificação do fabricante (parafusos de alta resistência Ø 3/4" UNF X 3 3/4" A-490 Cabeça 32mm) e utilizar acionamento auxiliar para continuar o posicionamento das sapatas.

- Após o posicionamento de todas as sapatas realizar o torque utilizando torquímetro manual ou a bateria utilizando 486 a 520 N.m de Torque conforme parâmetros do torquímetro utilizado (Manter padrão de torque).

1.2 – Falha no nivelamento do AL, onde a distância entre as sapatas e os trilhos devem oscilar no máximo de 3 a 5 mm. Esta hipótese não foi verificada neste momento, porém na Figura 37 é possível verificar o desnivelamento do conjunto já que a esteira não toca uniformemente todos os rolos de carga.

Figura 37 - Esteira distante do rolo de carga



Fonte: O autor.

1.3 – Falta de alinhamento topográfico do conjunto. Foi evidenciado o desgaste na lateral dos dentes do segmento dentado da roda motriz, como na Figura 38, que sinaliza um desalinhamento do AL. Atividade foi realizada com o método da linha e não proporcionou o alinhamento com a precisão adequada.

Figura 38 - Roda dentada com marcas na lateral dos dentes



Fonte: O autor.

2.1 - Roda guia fora da especificação de projeto ($D < 110\text{mm}$). A Figura 39 mostra que a roda guia instalada é divergente do projeto e não foi substituída. A roda com diâmetro menor prejudica a condução adequada da esteira causando folga (“embarrigamento”) e falha no assentamento da esteira no retorno do conjunto sobre os rolos de retorno do alimentador de sapatas.

Figura 39 - Roda guia menor que a de projeto



Fonte: O autor.

2.2 – Foi verificada incompatibilidade de especificação de parafusos e porcas. Código de compra utilizando fornecedor/fabricantes diferentes com tipos de roscas distintas UNF e UNC. Falha no processo de gestão de estoque de ativos críticos (AL), que geraram aplicações despadronizadas, exemplo: Na Figura 40 observa-se que foram encontrados pelo menos 4 tipos diferentes de parafusos aplicados no AL;

Figura 40 - Parafusos de fixação diversos



Fonte: O autor.

2.3 – Conjunto carro tensor deformado plasticamente. A Figura 41 mostra que o tirante do carro tensor está empenado e não foi substituído.

Figura 41 - Tirante do carro tensor empenado



Fonte: O autor.

3 – Uso de ferramenta inadequada, para a aplicação de torque dos parafusos da sapata (sem controle do torque aplicado). Na Figura 42 indica-se a ferramenta usada erroneamente.

Figura 42 - Parafusadeira usada erroneamente



Fonte: Catálogo Makita.

A questão do ferramental foi corrigida com a recomendação da torqueadeira apresentada na Figura 43.

Figura 43 - Recomendação de ferramenta para torque

Part. Number	Descritivo do Contrato	Referencia
FER48404	TORQUEAD BAT ANG LAW22 E=1P 300-2200NM	LAW22
FER49163	TORQUEADEIRA BATERIA ANGULAR LAW-40 E=1 500-4000 NM 5,5RPM	LAW-40
FER49160	TORQUEADEIRA BATERIA ANGULAR LAW-60 E=1.1/2 700-6000 NM 5,5RPM	LAW-60

Part. Number	Descritivo do Contrato
FER47071	CHAVE IMPACTO 1 M18 FUEL ONEKEY
FER10762	BATERIA RECARREGAVEL ION LITIO 18V
FER44061	CARREGADOR BAT 220VCA 12V



Fonte: O catálogo Makita.

4 – Sujidade no retorno do AL que pode calçar o conjunto e prejudicar o devido assentamento entre as sapatas. Foi evidenciado vazamento de material na descarga do AL, como mostra a Figura 44, gerando acúmulo de material no retorno da sapata. Essa pendência foi tratada, sendo realizada limpeza do sistema, identificada as regiões de vazamento e será inserido no plano de inspeção e manutenção do equipamento, para que novos acúmulos sejam evitados.

Figura 44 - Minério acumulado no retorno do AL



Fonte: O autor.

5- Na Figura 45 é possível verificar a melhoria no processo de torqueamento dos parafusos da sapata do Alimentador, onde a equipe encosta o parafuso com a parafusadeira e em seguida confere o torque com o uso do torquímetro Tramontina Pro, modelo de estalo, de tag TO23, mecânico ajustável, cujo certificado de calibração foi emitido dia 29/05/2023, conforme a norma de referência ABNT NBR ISO 6789-2.

Figura 45 - Equipe de manutenção corrigindo fixação da sapata



Fonte: O autor.

Porém, mesmo após todos os esforços descritos acima não foi possível definir a causa raiz e o problema persistiu por aproximadamente 1 ano após a troca do alimentador de sapatas.

Infelizmente algumas hipóteses já haviam sido sinalizadas como prováveis porém não foram possíveis de serem realizadas já que se tratam de atividades complexas, que requer muito tempo disponível com a usina parada e muitos recursos, além de expor os empregados a um grande risco. Dentre elas citamos a topografia para alinhamento e nivelamento entre a sapata e os trilhos inferiores, a troca do carro tensor e a substituição das rodas guia.

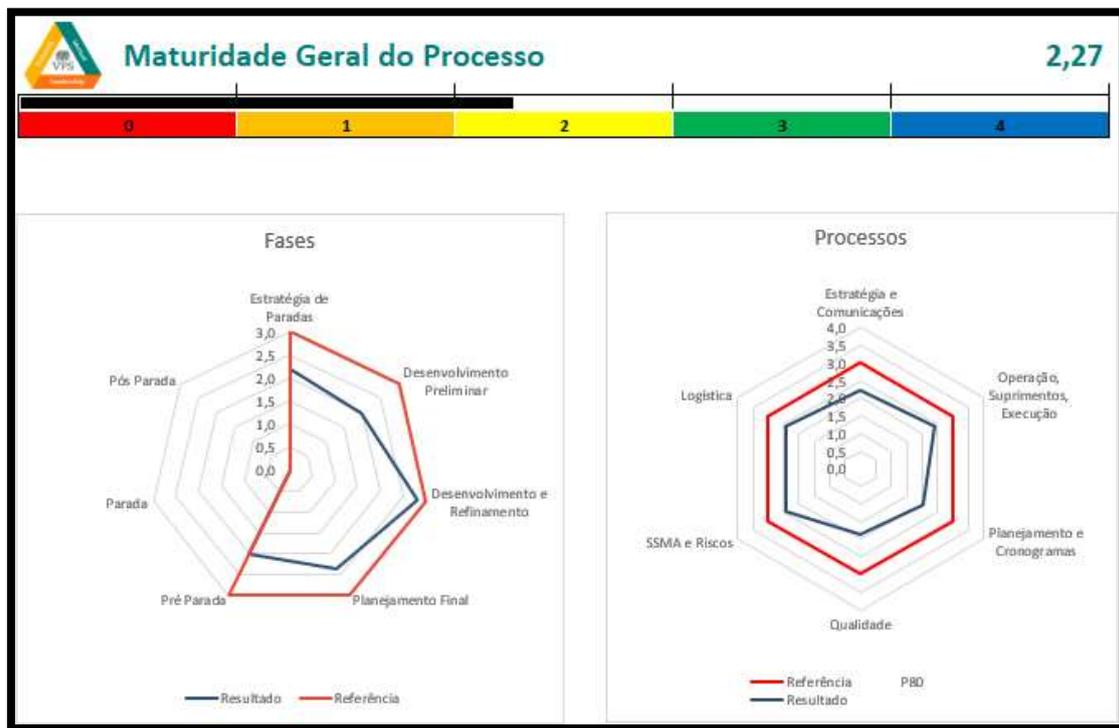
No entanto, estava planejado para junho/2023 uma grande parada da usina, com duração de 7 dias, para que fossem realizadas grandes manutenções, que não podem ser realizadas nas paradas rotineiras mensais, que tem duração de 2 a 3 dias, onde deveriam ser verificadas as hipóteses restantes já que o principal objetivo era a intervenção no AL 1210KL-01 para eliminar as quebras de parafusos de fixação das sapatas nas esteiras

Sendo assim observou-se a necessidade de organizar todas as informações coletadas até o momento, incluir algumas que eventualmente não foram sugeridas, e para isso utilizamos a metodologia da árvore de falhas (FTA), uma metodologia mais completa, que contempla diversas visões, considerando possíveis falhas de projeto, fabricação, manutenção e operação. Na Figura 46 é apresentada a árvore de falhas para o caso em questão. Foram elencados alguns tópicos, como falha de projeto, falha de fabricação, falha de manutenção e falha operacional.

A hipótese de falha de projeto foi no sentido de que a especificação dos parafusos estava incorreta. Essa hipótese foi tratada em paralelo, e não será apresentada nesse trabalho, por envolver grande complexidade de dimensionamento da carga e de esforços e por envolver sigilo por parte do fabricante. Porém, foi constatado que o dimensionamento e a especificação dos parafusos estavam de acordo com a aplicação.

A hipótese de falha de fabricação foi dividida em função dos componentes, sendo acionamento, eixo motriz, esteira e sapatas. Para o acionamento foram conferidas as especificações de projetos, já para o eixo motriz, esteira e sapatas foram verificados as medidas de projeto em campo, as especificações dos materiais, foram medidas as durezas dos materiais com o durômetro de Leeb (portátil), e assim foi constatado que os materiais estão corretamente selecionados, por serem aços com boa resistência mecânica e, no caso das sapatas apresentam elevada resistência ao impacto e ao desgaste.

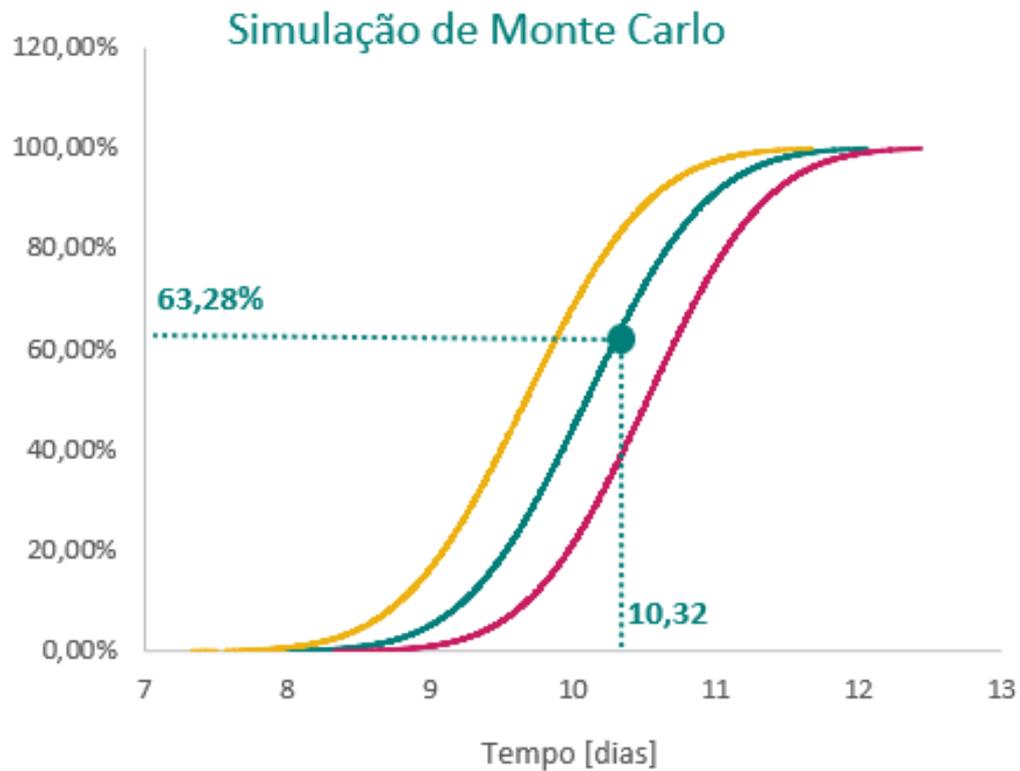
Figura 47 - Gráfico da maturidade da parada de manutenção



Fonte: O autor.

Como a data prevista para a realização da parada de manutenção estava próxima e a maturidade dela estava abaixo do esperado, foi realizada uma simulação estatística de Monte Carlo para medir a probabilidade de execução da pauta prevista do caminho crítico no prazo programado. A simulação de Monte Carlo, apresentada na Figura 48, mostrou que a probabilidade seria de 63,28% de executar as atividades do caminho crítico, no prazo de 11 dias com intervalo de confiança de 95%. Diante dos fatos foi recomendada a postergação da data da parada para a intervenção devida no equipamento, já que a probabilidade de execução estava abaixo do que é requerido, evitando assim que o tempo de máquina parada superasse o especificado e de que a intervenção não fosse realizada adequadamente.

Figura 48 - Simulação de Monte Carlo da parada de manutenção



Fonte: O autor.

Foi então elaborada uma análise de riscos da parada, com base em estudos de confiabilidade, onde foram feitas recomendações complementares com medidas de controles direcionados as 10 frentes que historicamente mais impactam e geram atrasos nas paradas de manutenção da usina de Serra Leste, como mostrado na Figura 49, buscando alavancar de forma agil a maturidade da parada.

Figura 49 - Análise de riscos da parada



Fonte: O autor.

A parada de manutenção foi realizada entre o final do mês de junho e início do mês de julho de 2023, os pontos levantados foram tratados conforme é mostrado na Figura 50, Figura 51 e Figura 52. Na Figura 50 é mostrado o eixo de acionamento do AL em manutenção. Na Figura 51 é mostrada a substituição do carro tensor do AL e na Figura 52 a substituição dos parafusos de fixação das sapatas do AL, utilizando torquímetro conforme especificado.

Figura 50 - Manutenção no eixo de acionamento do AL



Fonte: O autor.

Figura 51 - Substituição do carro tensor do AL



Fonte: O autor.

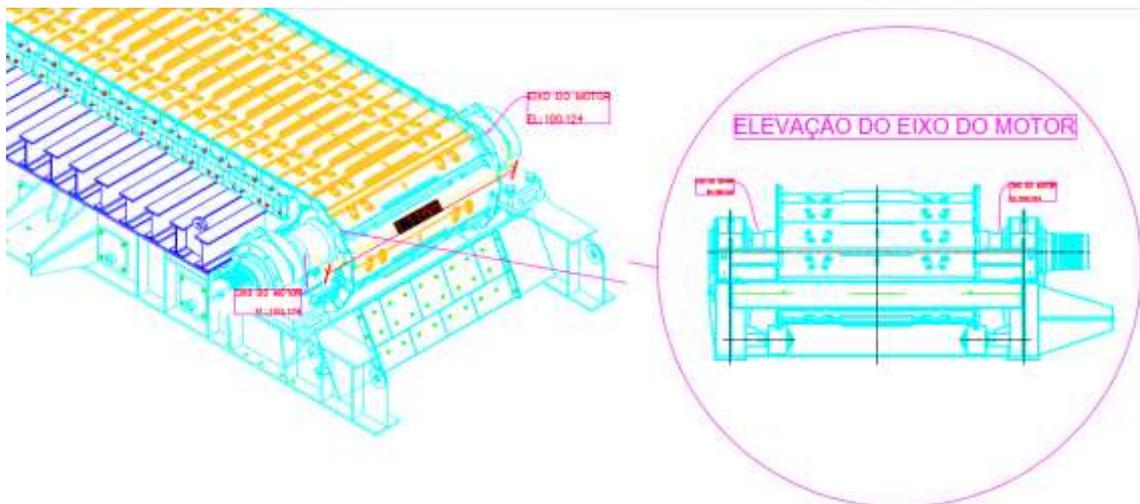
Figura 52 - Substituição dos parafusos de fixação das sapatas do AL



Fonte: O autor.

Na Figura 53 observa-se a evidência da topografia para alinhamento e nivelamento do conjunto. No documento foram medidas as elevações e paralelismo entre cada extremidade dos eixos motriz e movido e os parâmetros foram ajustados conforme a tolerância admissível, no caso a maior diferença entre extremidades de mesmo eixo, no caso do movido, foi de 0,001mm.

Figura 53 - Topografia do Alimentador de Sapatas



Fonte: Manual Metso.

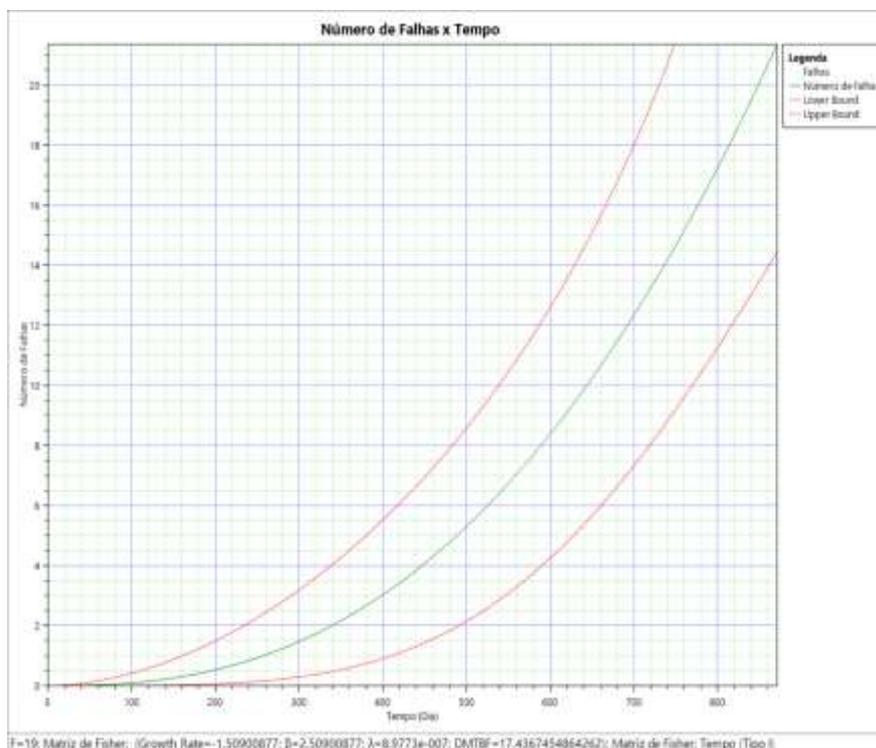
4.3 Análise de eficácia

Para a análise de eficácia da intervenção de manutenção planejada e executada no alimentador de sapatas foi avaliado o histórico de falhas e as curvas RGA (Análise do Crescimento da Confiabilidade), para fazer a análise de crescimento da confiabilidade do ativo. Quanto mais confiável for o componente, maior será a probabilidade de funcionar corretamente, sem qualquer contratempo.

Considerando o alimentador de sapatas um equipamento reparável, utilizando RGA com os dados de jan/2021 a jul/2023, registrados no SAP e analisadas com a ferramenta Orion, referentes aos problemas com parafusos/sapatas, o resultado estatístico nos indicou deterioração do sistema e recomenda reavaliar a política de manutenção ou estudar o ponto ótimo para realizar um overhaul. Sem descartar alterações de projeto que estariam comprometendo o sistema.

O gráfico “número de falhas x tempo” mostra que a quantidade de falhas acumuladas para um período de 1 ano seria de 2 falhas, sendo no melhor cenário 1 falha e no pior 4, como na Figura 54.

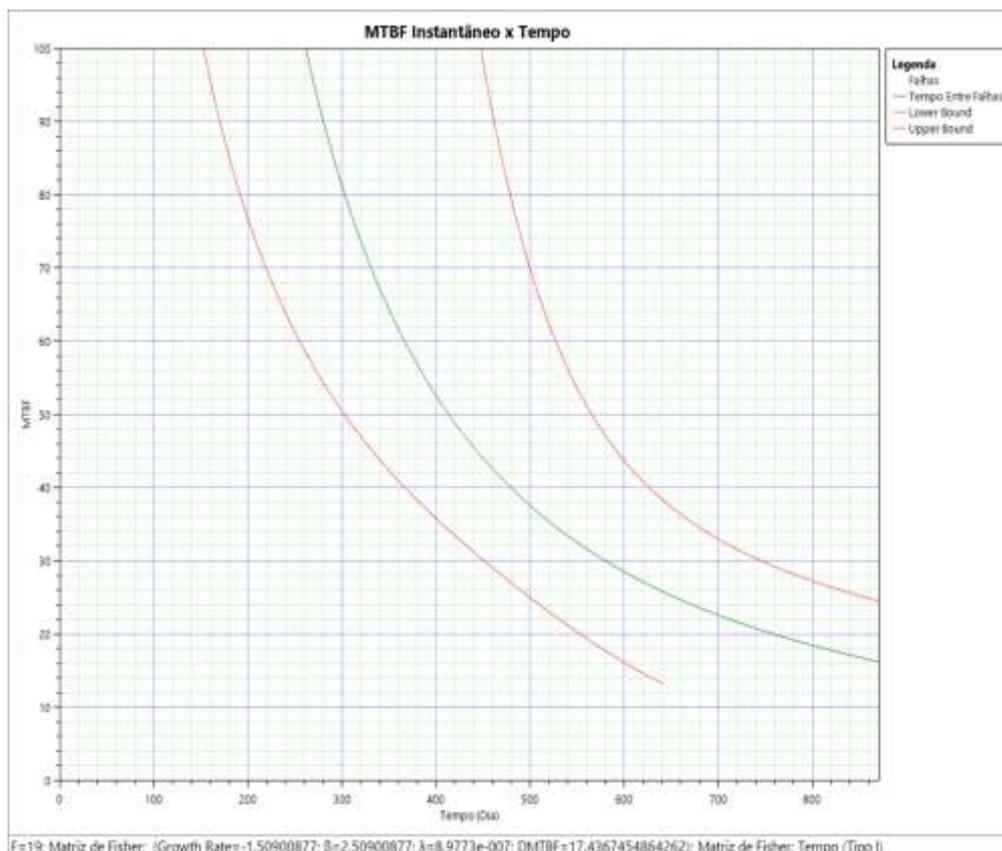
Figura 54 – Número de falhas x tempo



Fonte: O autor.

O gráfico “MTBF instantâneo x tempo” mostra que o MTBF instantâneo em um ano de operação seria de 64 dias, sendo no melhor cenário maior do que 100 dias e no pior 40 dias, como mostrado na Figura 55.

Figura 55 – Curva de MTBF instantâneo x tempo



Fonte: O autor.

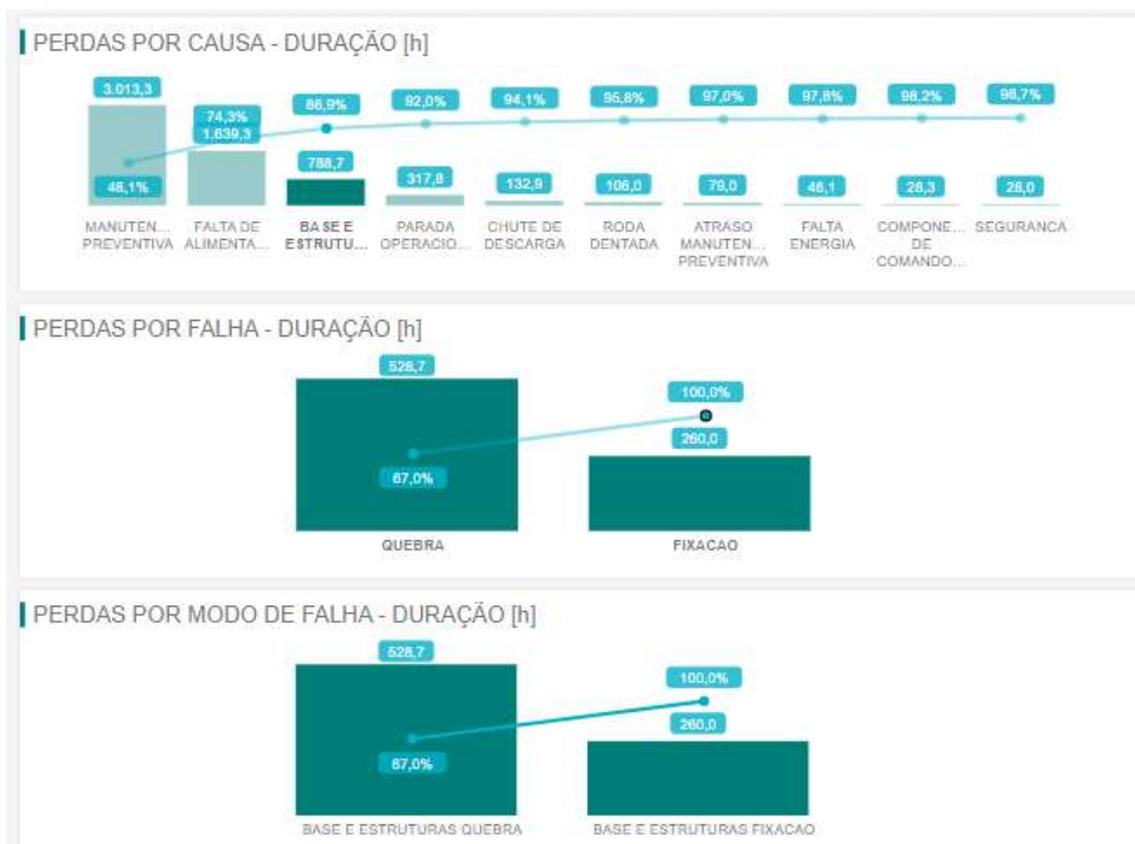
Os dados apresentados na Figura 54 e na 55 nos mostram estatisticamente a necessidade de intervenção para manutenção em uma frequência muito superior ao esperado, já que o histórico de vida útil do conjunto de alimentador de sapatas de Serra Leste supera 5 anos.

Como medida de contingência a partir de out/22 até a parada foram feitas paradas preventivas semanais para inspeção e correção de problemas de fixação do AL, evitando assim maiores impactos em corretiva.

A grande parada de manutenção para intervenção no AL aconteceu entre os meses de junho e julho de 2023, onde foram tratados todos os pontos levantados como caminho crítico da parada.

A Figura 56 mostra através do Diagrama de Pareto que a causa “base e estruturas”, cujo modos de falhas foram “quebra e fixação”, foi a 3ª do ranking de impactos da usina e o primeiro de manutenções corretivas no período de Ago/22 a Ago/23.

Figura 56 - Paretos de causas e modos de falha



Fonte: O autor.

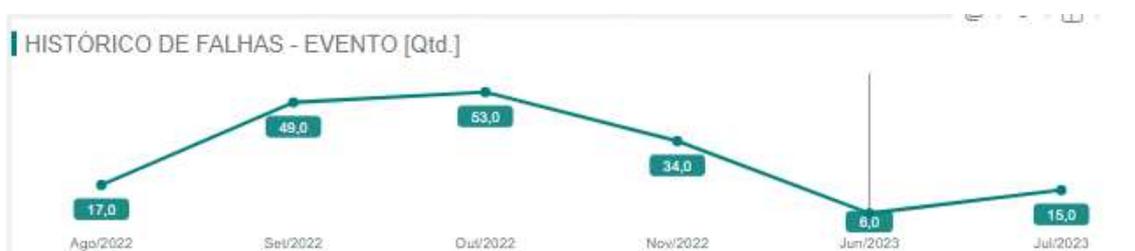
As Figura 57 e 58 mostram o histórico de falhas com base em duração (horas e número de eventos) na mesma ordem, no período de Ago/22 a Ago/23, onde observa-se o pico de falhas entre agosto e setembro de 2022, em seguida com as medidas de contingência, correções conforme orientações técnicas e decisão de paradas estratégicas semanais para inspeção e correções pontuais para evitar impactos maiores, observa-se que as falhas e seus impactos diminuíram até que cessaram após a grande parada de manutenção de manutenção em meados de julho/2023.

Figura 57 - Histórico de falhas - duração (horas)



Fonte: O autor.

Figura 58 - Histórico de falhas - eventos (quantidade)



Fonte: O autor.

Com isso a análise de eficácia sinaliza que a intervenção no AL1210KL01 em jul/23 foi eficaz, tendo em vista que não foram observadas novas ocorrências pelo período acompanhado até o momento, de 3 meses, do modo de falha quebra e fixação – causa Bases e estruturas.

Diante de tudo que foi exposto ressalta-se a importância da utilização de metodologias apropriadas para as atividades de planejamento e de análise de falhas, com muita disciplina e rigor, utilizando ferramentas como o Ishikawa, PDCA, árvore de falhas, avaliação de grau de maturidade das paradas, entre outras. No caso da árvore de falhas é possível observar que é uma ferramenta muito ampla, com visões macro de cenário e que permite com exatidão a verificação tanto de tarefas a serem planejadas como para hipóteses de causas em análises de falhas, para eliminá-las ou para priorizá-las, possibilitando ao estudioso se antecipar ao problema, dando previsibilidade para a equipe de planejamento, ou direcionando o trabalho de forma assertiva e ágil na análise de falhas.

Complementar aos pontos anteriormente citados é importante observar também a contribuição e direcionamento que as ferramentas estatísticas tais como

simulação de Monte Carlo, RGA e histórico de falhas podem trazer para o trabalho, dando ênfase aos pontos e cenários críticos da análise.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados históricos foi observado que na atividade de troca do alimentador de sapatas realizada em agosto de 2022 não foi feito um planejamento apropriado da atividade e este caso reforça a importância da realização de planejamentos de manutenção de forma estruturada, organizada e considerando todos os procedimentos, ferramentas disponíveis e recursos disponíveis, principalmente em atividades de alta complexidade e que não podem ser realizadas na rotina, já que representam grandes impactos de produção e principalmente expõem pessoas a grandes riscos.

Atestando que a análise foi adequada e que as medidas tomadas foram apropriadas realizamos o check de eficácia e constata-se que, desde a conclusão da parada para a intervenção e correção dos modos de falhas do alimentador de sapatas da usina 1 de Serra Leste, não foram observadas falhas no período de três meses, sem nenhuma quebra de parafusos de fixação das sapatas do alimentador de sapatas AL-1210KL-01.

Contudo destacam-se algumas recomendações que devem ser realizadas com o maior nível de qualidade possível em uma parada de manutenção onde se pretende substituir um alimentador de sapatas, ou mesmo componentes de complexidade similar:

- Garantir que todos os roletes estejam aplicados e em condições operacionais (nenhum travado). É importante garantir que os equipamentos estejam nas condições de projeto e caso seja necessária alguma alteração, um estudo aprofundado e análise dos impactos da alteração deve ser realizada de forma criteriosa.

- Realizar alinhamento e nivelamento das esteiras do alimentador de sapatas com topografia, de forma que as esteiras toquem todos os roletes de carga. Isso evita sobrecarga e flexão excessiva nas sapatas que estejam acima do nível das outras.

- Realizar alinhamento e nivelamento dos trilhos de impacto com topografia, de forma os trilhos de impacto e a parte inferior da sapata não devem se tocar e a folga entre eles deve ser 3 mm (com tolerância de 1 mm). A sapata somente toca o trilho quando ocorre um impacto muito grande, evitando assim flexão excessiva na sapata.

- Garantir intertravamento do alimentador de sapatas com o nível da moega quando estiver com altura da camada de, aproximadamente, 890 mm de material sobre o alimentador de sapatas.

REFERÊNCIAS

BUDA, J. **Why Bolts Fail? Machine Design**, Edited by Stephane Muraski Johnson, 1994.

CASTRO, Paulo M. S. T. de; FERNANDES, A. A. **Methodologies for failure analysis: a critical survey**. 2004.

DOBASHI, T.; CORREA, F. **Análise de causa raiz: técnicas e aplicações**. In: 7o. CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, 31 de agosto - 3 de setembro, 1999, Belo Horizonte, MG. 1999. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/18873>. Acesso em: 02 fev. 2024.

FIGUEIREDO, Danielle Lima de. **Gestão de Manutenção: Metodologias e Ferramentas para análise de falhas**. In: 9º. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, de 04 a 06 de dezembro de 2019, Ponta Grossa, PR, Brasil. Disponível em: https://aprepro.org.br/conbrepro/2019/anais/arquivos/10202019_011052_5dabdc30a9927.pdf

GIORDANI, Tiago; SARTORI, Marcelo; STADLANDER, Antonio Ricardo; MACEDO, Marcio Levi Kramer de; REGULY, Afonso. **Análise de falha em parafusos utilizados em equipamento de moagem de minério**. In: 68º Congresso da ABM — vol. 68, num.68 (2013).

HEUVEL, L. N. V.; LORENZO, D. K.; JACKSON, L. O.; HANSON, W. E.; ROONEY, J. J.; WALKER, D. A. **Root Cause Analysis Handbook: a guide to efficient and effective incident investigation**. ABS Consulting. 3.ed. Brookfield: Rothstein Associates Inc, 2008.

NISHIDA, S. **Failure Analysis in Engineering Applications**, Butterworth-Heinemann, Great Britain, 1992.

REGULY, A., LIMBERG, I., MACEDO, M. L. K., GRIZA, S., STROHAECKER, T., 2010. **Fadiga e Análise de Falha**. Laboratório de Metalurgia Física, UFRGS.

ROSA, Edison. **Análise de Resistência Mecânica – Mecânica da Fratura e Fadiga**. Universidade Federal de Santa Catarina, pg. 223, 2002.

VALLES GONZÁLEZ, P.; MURO, A. Pastor; GARCÍA-MARTÍNEZ, E. M. **Failure analysis study on a fractured bolt**, National Institute of Aerospace Technology (INTA), Ctra. Torrejón-Ajalvir, Km. 4, 28850 Torrejón (Madrid), Spain. 2020.

VICENTE, Angélica de Fatima Nogueira. **Análise de Falhas em grampos ferroviários tipo Fastclip**, 2021, Juiz de Fora. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/13021>

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (OACI) **Manual of Aircraft Accident and Incident Investigation**, o anexo 13 na parte 1 que trata sobre organização e planejamento do Doc 9756.

ANEXOS

Anexo A – Planilha de avaliação de maturidade de paradas de manutenção elaborada pela Vale.