

Centro universitário Evangélico de Goianésia - UNIEGO
Curso de Engenharia Mecânica

MURILO HENRIQUE JESUS MIRANDA
FELIPE JUNIO CRUZ SILVA

**ANÁLISE DE FALHA NA RODA DE CAÇAMBA UTILIZADA EM UMA
RETOMADORA DE MINÉRIO**

Publicação N° 02

Goianésia - GO
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

MIRANDA, MURILO HENRIQUE JESUS; SILVA, FELIPE JÚNIO CRUZ SILVA.

Análise de falha na roda de caçamba utilizada em uma retomadora de minério, 2025, 21P, 297 mm (ENM/UNIEGO, Bacharel, Engenharia Mecânica, 2025).

ARTIGO – UNIEGO – CENTRO UNIVERSITÁRIO EVANGÉLICO DE GOIANÉSIA

Curso de Engenharia Mecânica.

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1. Fadiga; | 2. Propagação de trincas; |
| 3. Ensaio não destrutivo. | 4. Falha |
| I. ENM/UNIEGO | II. Analise de falha |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MIRANDA, M. H. J.; SILVA, F. J. C Análise de falha na roda de caçamba utilizada em uma retomadora de minério. Artigo, Publicação 01 2025/1 Curso de Engenharia Mecânica, Centro universitário Evangélico de Goianésia - UNIEGO, Goianésia, GO, 18p. 2025.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Miranda, Murilo Henrique Jesus; Silva, Felipe Júnio Cruz Silva.

TÍTULO DO TRABALHO DO ARTIGO: Análise de falha na roda de caçamba utilizada em uma retomadora de minério.

GRAU: Bacharel em Engenharia Mecânica ANO: 2025

É concedida ao Centro universitário Evangélico de Goianésia - UNIEGO a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Documento assinado digitalmente
 MURILO HENRIQUE JESUS MIRANDA
 Data: 13/12/2025 14:56:42-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
 FELIPE JUNIO CRUZ DA SILVA
 Data: 13/12/2025 15:53:04-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Murilo Henrique Jesus Miranda
 76385-226 – Goianésia/ GO – Brasil

Felipe Júnio Cruz Silva
 76386-330 – Goianésia/ GO – Brasil

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, EM FORMA DE ARTIGO,
SUBMETIDO AO CURSO DE ENGENHARIA MECANICA DA UNIEGO**

Aprovados por:

Documento assinado digitalmente
 MARINES CHIQUINQUIRA CARVAJAL BRAVO GOI
Data: 13/12/2025 23:08:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes, Dra (UNIEGO)
(ORIENTADOR)**

Documento assinado digitalmente
 ALESSANDRO MORAIS MARTINS
Data: 16/12/2025 09:12:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Alessandro Morais Martins, Me (UNIEGO)
(EXAMINADOR INTERNO)**

Documento assinado digitalmente
 RAFAEL DE ANDRADE PERES
Data: 15/12/2025 23:11:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Rafael De Andrade Peres, Me (UNIEGO)
(EXAMINADOR INTERNO)**

ANÁLISE DE FALHA NA RODA DE CAÇAMBA UTILIZADA EM UMA RETOMADORA DE MINÉRIO

Murilo Henrique Jesus Miranda¹, Felipe Júnio Costa Silva²
e Marines Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes³

¹Acadêmica de Engenharia Mecânica/UNIEGO Email: jesusmurilohenrique@gmail.com

²Acadêmico de Engenharia Mecânica /UNIEGO Email: junio3616@gmail.com

³Orientador(a) e Professor(a) do Curso de Engenharia Mecânica/UNIEGO Email: marines.gomes@docente.evangelicogojanesia.edu.br

Resumo: Equipamentos como retomadoras de minério são amplamente utilizadas no processo de beneficiamento na mineração, e a sua manutenção tem custo alto comparado a demais equipamentos utilizados nesse tipo de negócio, devido ao seu tamanho e nível de complexidade. Uma falha que ocorre constantemente, de acordo com os relatórios e divulgações de manutenção, é a propagação de trincas em diversos pontos, gerando uma fratura ou colapso estrutural. Este problema vem sendo tratado pela manutenção, através da soldagem em partes com a propagação, porém a causa raiz da falha não está sendo tratada. Este estudo de caso tem como objetivo investigar a propagação de trincas derivadas de fadiga do material, aço ASTM A572, material utilizado para fabricação da roda de caçamba da recuperadora de minério em sua maioria, como também as suas principais causas e possíveis soluções. Para desenvolvimento do trabalho, foi utilizado ensaios não destrutivos, como ultrassom e líquido penetrante, com o intuito de identificar e determinar a origem de uma trinca na roda de caçamba em utilização, auxiliado por modelação 3D e simulação, a fim de identificar pontos de acúmulo de tensão na estrutura. Com base nos resultados e análises técnicas, conclui-se que a falha por trinca na roda de caçamba da retomadora é predominantemente causada pelo processo de soldagem inadequado aplicado na união. A metodologia MASP e os ensaios não destrutivos confirmaram falhas na solda e na ZTA.

Palavras-chaves: Fadiga; Propagação de trincas; Recuperadoras de minério; Roda de caçamba; Ensaio não destrutivo.

Abstract: Equipment such as reclaimers is widely used in the beneficiation process in mining, and their maintenance is costly compared to other equipment used in this type of business, due to their size and complexity. A failure that occurs constantly, according to maintenance reports and disclosures, is the propagation of cracks at various points, generating a fracture or structural collapse. This problem has been addressed by maintenance through welding in parts with propagation, but the root cause of the failure is not being addressed. This case study aims to investigate the propagation of fatigue cracks in the material, ASTM A572 steel, the material used to manufacture the bucket wheel of the ore reclaimer in most cases, as well as its main causes and possible solutions. For the development of the work, non-destructive tests were used, such as ultrasound and penetrant testing, to identify and determine the origin of a crack in the bucket wheel in use, aided by 3D modeling and simulation, to identify points of stress accumulation in the structure. Based on the results and technical analyses, it is concluded that the crack failure in the reclaimer's bucket wheel is predominantly caused by the inadequate welding process applied to the joint. The MASP methodology and non-destructive testing confirmed flaws in the weld and in the HAZ (Heat Affected Zone).

Keywords: Fatigue; Crack propagation; Ore reclaimers; Bucket wheel; Non-destructive testing.

INTRODUÇÃO

Inicialmente, na mineração, assim como em outras indústrias, a manutenção era reativa, ou seja, era realizada apenas quando o ativo apresentava falha ou quebra, sendo então reparado ou substituído. Não existiam táticas ou estratégias voltadas à prevenção de falhas ou à análise de suas causas. Com o avanço da mecanização na mineração, impulsorado pela globalização e crescente demanda por matérias-primas para a fabricação de produtos metálicos, especialmente entre o final do século XIX e o início do século XX, aumentou significativamente a dependência de equipamentos complexos operando em ambientes extremos, visando aumentar a produtividade em menor tempo para atender à demanda, mas o crescimento acelerado levou a quebras inesperadas, causando impactos na produção e custo operacional [1].

A redução das falhas inesperadas só começou a ocorrer quando se percebeu que prevenir era mais eficaz do

que apenas corrigir. Essa mudança impulsionou o desenvolvimento da manutenção preventiva, baseada em inspeções regulares, lubrificação, ajustes e substituição de componentes em intervalos predefinidos conforme o tempo de operação ou orientações dos fabricantes, contribuindo para reduzir o índice de falhas catastróficas em equipamentos pesados e de alto custo, como escavadeiras, retomadoras, caminhões fora de estrada, sistemas de britagem, fornos, dentre outros [1].

A manutenção preventiva, não era suficiente para eliminar todas as falhas, pois atuava somente antes da falha ocorrer e não na origem do defeito, portanto era crucial entender por que as falhas ocorriam para evitar sua recorrência, melhorar o projeto, a manutenção ou a operação dos equipamentos. Diante desse cenário a necessidade de analisar a falha a fim de identificação a causa raiz do problema fez-se necessário, esta disciplina surgiu utilizando técnicas de inspeção, coleta de dados, análise de históricos exames metalúrgicos/ metalográficos

básicos para identificação do modo de falha/ quebra e promover estratégias para aumento da durabilidade, resistência de seus materiais, aumento de confiabilidade, dentre outras necessidades da empresa [2].

A mecânica da fratura, um campo que estuda o comportamento de materiais como trincas, começou a ser aplicada na análise de falhas, em especial em componentes metálicos sujeitos a cargas cíclicas ou tensões elevadas, essa abordagem permitiu entender melhor como as trincas se iniciam, propagam e levam à fratura, fornecendo informações para determinar a vida útil restante de um componente, estabelecer intervalos de inspeção mais eficazes e desenvolver critérios de aceitação para defeitos.

Na mineração, a mecânica da fratura se tornou particularmente relevante para analisar falhas em estruturas soldadas de grandes equipamentos, eixos, engrenagens e outros componentes críticos sujeitos a condições de carregamento severas e ambientes agressivos. Com os avanços tecnológicos, a engenharia de manutenção evoluiu para a manutenção preditiva, utilizando sensores e técnicas de monitoramento (vibração, temperatura, ultrassom, análise de óleo, etc.) para detectar sinais precoces de falhas e intervir antes que ocorram quebras.

Atualmente, a engenharia de manutenção na mineração está cada vez mais focada na gestão de ativos, adotando uma visão holística que considera o ciclo de vida completo dos equipamentos, desde o projeto e aquisição até a operação, manutenção e descarte. A análise de falhas, com o suporte da mecânica da fratura e outras ferramentas/ técnicas de engenharia, desempenha um papel fundamental na otimização do desempenho dos ativos, na redução de custos e na garantia da segurança e sustentabilidade [3].

A análise de falhas se tornou uma parte da estratégia de manutenção, ajudando a validar os diagnósticos e a entender as condições anormais detectadas no monitoramento, realizando estudos, propondo melhorias no sistema, modificação de projeto ou mudança de operação antes mesmo que uma falha ocorra ou antes que ela se agrave, ocasionando em um grande tempo de inatividade do sistema ou equipamento daquela indústria.

Diante do exposto, a justificativa para o desenvolvimento do presente trabalho foi exatamente a necessidade de explorar, de maneira científica, um dos principais modos de falha em máquinas e equipamentos da mineração que são as falhas sob fadiga e fratura de componentes. Em especial conhecer os fatores que influenciam a velocidade de propagação de trincas e relacionar os conceitos com o comportamento real da roda de caçambas de recuperadoras de minério em serviço.

Este trabalho tem como objetivo analisar a falha numa roda de caçamba de uma retomadora de minério localizada em um sistema de preparação de cargas, utilizando fundamentos de mecânica da fratura, a fim de identificar as possíveis causas. Avaliando as regiões falhadas por desenho técnico, determinar a origem e propagação da trinca identificada por ensaio END, propor melhorias de sistema, mudança de projeto ou mudança de operação/ manutenção.

REFERENCIAL TEÓRICO

O processo de beneficiamento em uma mineradora é um conjunto de operações físicas e químicas que visam separar os minerais de valor econômico da ganga (os minerais sem valor) presentes no minério bruto extraído da mina. O objetivo final é obter um concentrado do mineral desejado com a maior pureza possível, tornando-o economicamente viável para as etapas posteriores, como a metalurgia (refino) ou a venda direta.

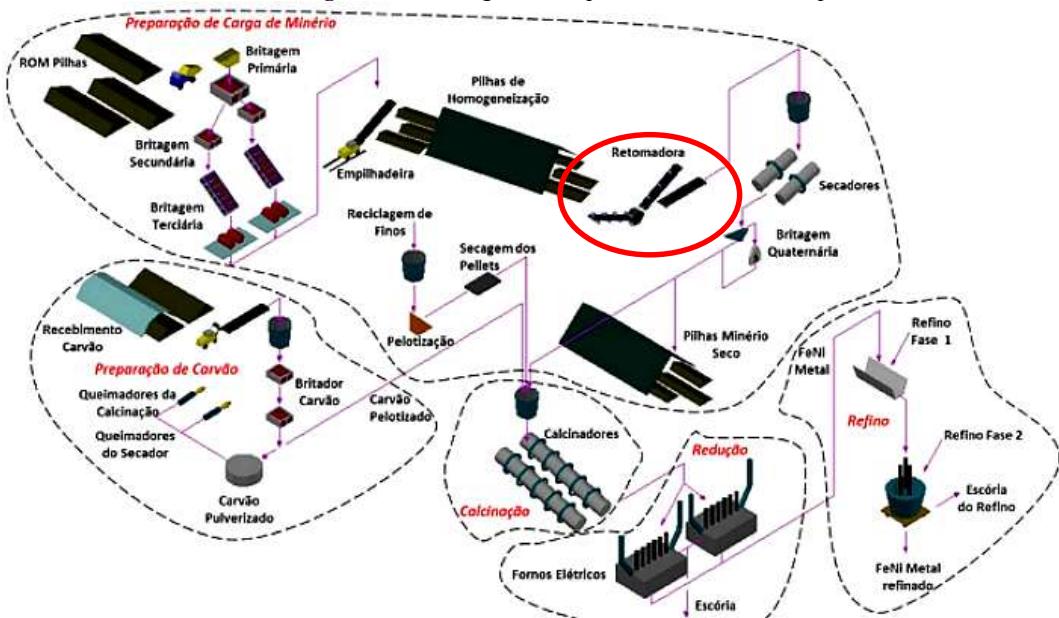
A complexidade e as etapas específicas do beneficiamento variam de acordo com o minério que está sendo extraído, dos minerais de interesse e das características da ganga. Em um sistema de produção de Ferro Níquel o processo tem algumas etapas bem definidas:

Conforme demonstrado na Figura 1, o processo inicia-se com um sistema britagem (Cominuição Primária, secundária e terciária) composto por britadores de rolos que tem como objetivo reduzir o tamanho até atingir uma granulometria de 75 mm de minério bruto para liberar os minerais e facilitar o transporte, em seguida empilha-se o

minério utilizando uma empilhadeira afim de realizar a homogeneização do minério para o processamento, após este inicia-se a retomagem do minério utilizando uma retomadora (indicada no círculo vermelho da Figura 01) que tem como objetivo realizar a mistura inicial do

minério, em seguida inicia-se a secagem e britagem quartenaria, então o minério seco é inserido em fornos calcinadores, para ser realizar a secagem final, logo após a fusão/ separação em fornos elétricos, e por fim refinado com a adição de reagentes em fornos eletrolíticos [4].

Figura 1 - Fluxograma de processamento de Níquel.



Fonte: Anglo American, 2025.

Todas as etapas exigem equipamentos robustos, suscetíveis a falhas que podem paralisar uma linha de processamento ou todo processo de beneficiamento de minério. As retomadoras conforme exemplo da Figura 2 são grandes equipamentos que têm como objetivo a transferência de minério estocado em pilhas localizadas em grandes pátios para seu reprocessamento a fim de continuar ou finalizar o processamento do minério bruto.

Figura 2: Retomadora de minério.



Fonte: Isomonte, 2025.

As retomadoras ou recuperadoras (*reclaimers*) são compostas por sistemas complexos de movimentação, dependendo assim de reparos mais precisos em sua estrutura/ componentes, seus sistemas precisam ser coordenados para alcançar a máxima performance e produtividade. A melhor combinação entre os aspectos de controle que são a velocidade angular e avanço do lance de ataque da roda de caçambas mais o balanceamento geral do conjunto e estrutura do lance, permitem que a máquina seja utilizada de maneira produtiva, segura e confiável [5].

A roda de caçambas (geralmente são protegidas interna e externamente por material resistente à abrasão) é o componente de ataque ao material a ser retomado. A roda de caçambas pode ser acionada por sistema mecânico convencional ou sistema hidráulico. A quantidade de caçambas varia de acordo com a geometria e taxa de trabalho a qual a máquina foi projetada para trabalhar [6].

Em resumo, o beneficiamento mineral é um processo fundamental na indústria de mineração, que transforma o minério bruto em um produto mais adequado para as etapas seguintes da cadeia produtiva. A escolha das tecnologias e a otimização do processo dependem das características específicas de cada jazida mineral [7].

No vocabulário da engenharia, o termo fadiga do material significa falha do material as quais podem ocorrer sob repetidos ciclos de carregamento e descarregamento, concentração de tensão são particularmente severos em defeitos internos e externos que se comportam como trincas, em processos de soldagem a ocorrência de defeitos semelhantes a trincas é muito comum tornando-se críticos de concentração de tensão, a partir dos quais a trinca poderá propagar-se de forma estável ou não, e até mesmo em situações limite levar a estrutura ao colapso [12].

Três dos métodos mais usados e conhecidos na análise da fadiga são: a abordagem pela tensão ou curvas S-N; a abordagem pela deformação ou curvas ϵ -N e a abordagem pela Mecânica da Fratura. Fadiga em metais é um processo que causa uma falha prematura, ou seja, a ruptura ou perda da funcionalidade de um componente sujeito a um carregamento repetido. A disciplina Mecânica da Fratura se desenvolveu originalmente baseada no princípio da linearidade elástica, e depois foi estendida para comportamento não-linear elástico [8].

As falhas de componentes mecânicos e estruturas, em muitos casos, dentre os fatores que causam fratura pode-se listar: a seleção imprópria de materiais, a presença de defeitos de fabricação, erros de projeto ou de montagem, negligência na manutenção, e modificações sem cálculos.

A análise de componentes estruturais obteve um desenvolvimento acelerado nas últimas décadas, com o surgimento de estudos detalhados nos campos de fadiga, mecânica da fratura, confiabilidade estrutural, método numérico de análise estrutural, dentre outras técnicas [9].

Falha é o termo utilizado para definir que um componente ou peça não tem capacidade de desempenhar a função requerida, após a falha o item tem uma pane (estado do item caracterizado pela incapacidade de

desempenhar uma função requerida) podendo se tornar inseguro [10]. A causa desta falha pode ser um colapso, na forma de uma ruptura, pode ser um desgaste excessivo, falta de rigidez ou outra causa. Para uma melhor compreensão do que ocorre com o sistema na condição de falha é necessário introduzir o conceito de modo de falha, ou seja, a definição física de falha [6].

A falha funcional ocorre quando a capacidade do sistema de suportar uma determinada demanda foi superada, em problemas estruturais pode-se descrever da seguinte forma: a resistência do sistema (R), não é suficiente para suportar a solicitação (S). Assim, a falha é definida pelo evento $S > R$. Já a resistência é uma característica intrínseca do sistema, dependendo de como este é construído, dimensões, materiais, dentre outros [9].

As falhas podem ser classificadas ainda como independentes do tempo e dependentes do tempo. As falhas independentes do tempo são aquelas que possuem a mesma probabilidade de ocorrência, qualquer que seja a vida ou tempo de uso do produto considerado. Essas falhas se manifestam quando a estrutura em questão sofre uma sobrecarga ou um pico de solicitação. Um exemplo deste modo de falha é a Fratura. As falhas dependentes do tempo são aquelas que variam em função do número de horas de trabalho do equipamento ou componente. Os principais modos de falha são: Desgaste, corrosão, fluência e fadiga.

A fadiga define-se como uma redução gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, consequência do avanço das fissuras micromolecular que se formam no seu interior. Este crescimento ocorre para cada flutuação do estado de tensões. As cargas variáveis, sejam cíclicas ou não, fazem com que, ao menos em alguns pontos, tenha-se deformações plásticas, também variáveis com o tempo. Estas deformações levam o material a uma deterioração progressiva, dando origem à trinca, se desenvolvendo até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, em geral brusca, apresentando características macroscópicas de uma fratura frágil [11].

Falhas por fadiga ocorrem em níveis de tensão inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais. Assim, quando estão envolvidos carregamentos dinâmicos, as teorias de falhas para carregamentos estáticos podem levar a projetos sem segurança. O processo de fadiga ocorre em três estágios: A nucleação engloba o período gasto para a formação e o crescimento inicial da trinca até que um comprimento macroscópico seja alcançado. A propagação é o período gasto para a trinca crescer e alcançar um tamanho crítico o qual leva à falha do componente, a fratura é o crescimento instável da trinca causando uma ruptura no material, como mostrado na Figura 3 [12].

Figura 3: Processo de fadiga do material.



Fonte: Norton, 2006.

Em vista das abrangências, complexidades e solicitações dos sistemas e equipamentos mecânicos, critérios de fadiga são aplicados nos dimensionamentos e projeções. As variáveis com uso de diferentes materiais, ciclos de carga, exigência de segurança etc. faz com que o critério de projeto e análise da resistência à fadiga tenha de ser diferente para cada caso considerado [9].

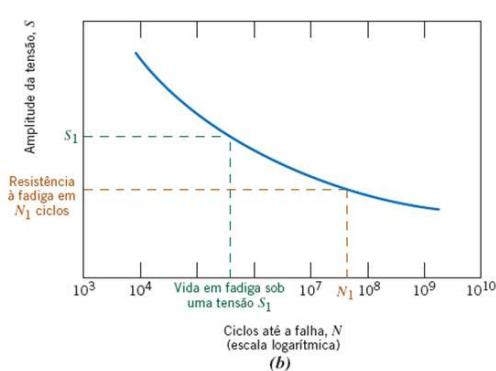
Com um estudo do gráfico, observa-se que quanto maior a tensão, menor será o número de ciclos antes de ocorrer a falha no material. Para algumas ligas ferrosas e de titânio, a curva S-N, Figura 4, se torna horizontal para valores de N mais elevados; ou seja, existe um nível de tensão de limite de resistência à fadiga, abaixo do qual a falha por fadiga não irá ocorrer. Para a maioria das ligas não ferrosas é aplicado a resistência a fadiga, pois eles não

possuem um limite de resistência à fadiga no sentido de que a curva σ - N continua a sua tendência decrescente para maiores valores de N conforme mostrado na Figura 5.

Fatores que afetam as curvas S-N são: acabamento superficial, tamanho da estrutura, tipo de carregamento e confiabilidade requerida pelo projeto [12].

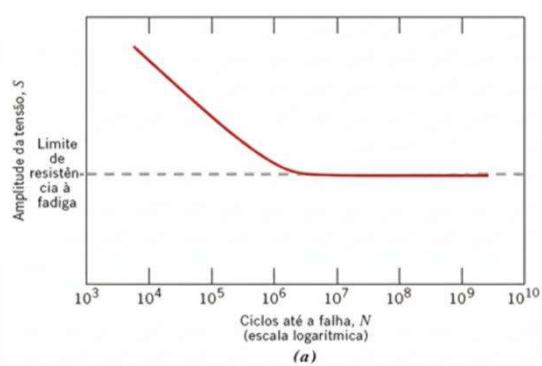
O método da tensão nominal apresenta limitações quanto à confiabilidade e sua aplicação. As curvas S-N não são apropriadas para descrever o estado físico da estrutura para um dado tempo e nem mesmo determinar com boa aproximação a resistência ou limite de fadiga em determinados pontos de um componente. Para tal, são necessários outros métodos de análise de fadiga [3].

Figura 4: Curva S-N



Fonte: Machado, 2006.

Figura 5: Curva σ - N



Fonte: Machado, 2006.

O comportamento macroscópico de determinado material fadigado, pode ser entendido com a resposta de tal material às tensões e deformações provocadas pelo carregamento cíclico [9].

O número crescente de falhas em estruturas solicitadas por tensões abaixo dos valores admissíveis

levou ao desenvolvimento dos princípios da mecânica da fratura, estes conceitos permitem a quantificação dos níveis admissíveis em que um componente com trincas pode operar, sem que ocorra a falhar [13].

O modo de falha habitual nestes casos era a propagação instável de uma trinca, sem que tivessem ocorrido deformações plásticas. Assim, a energia que era absorvida no processo de fratura era pequena. O principal ponto de estudo da Mecânica da Fratura é o comportamento do material quando contém uma trinca.

O processo de ruptura ocorre pelo crescimento de uma trinca que pode ser devido a um defeito inerente ao material, decorrente do processo de fabricação, como trincas de tratamento térmico, defeitos de soldagem, falhas internas em componentes fundidos etc. Em outros casos, a trinca pode-se desenvolver devido a uma solicitação dinâmica, como na nucleação de trincas de fadiga [9].

Uma trinca, para se propagar, exige que a tensão no seu extremo ultrapasse a tensão coesiva do material, que é a tensão que mantém os átomos unidos. Um critério para materiais frágeis, denominado de critério de Griffith, baseado em um balanço de energias, prevê a força que deve ser aplicada em um corpo para propagar a trinca, é mais adequado para iniciar o estudo da fratura [9].

Griffith formulou o conceito que uma trinca irá propagar- se quando a energia total do sistema for menor que a variação da energia de deformação resultante de um crescimento incremental da trinca [14].

A literatura afirma que a energia aproximada é equivalente ao fator de intensidade de tensão aproximado e que a propagação da trinca ocorre quando a taxa de energia de deformação (ou em termos do fator de intensidade de tensão crítico, K_c) é alcançada. O fator de intensidade de tensão K define a magnitude da tensão local em torno da ponta da trinca. Esse fator depende do modo de carregamento, do tamanho da trinca, da forma da trinca e fator geométrico para cada tipo de carregamento [14].

Na maioria dos casos, o material não pode ser considerado homogêneo, pois existem defeitos de fabricação, nestes casos, a vida de fadiga depende só da

resistência à propagação dos defeitos do material, já que a nucleação da trinca ocorre de forma imediata devido ao defeito existente. A previsão da resistência mecânica deve, nestes casos, levar em conta explicitamente a propagação da trinca. A vida útil é calculada unicamente pela propagação do defeito desde seu inicio até o correspondente tamanho crítico, que depende do material, do carregamento e da geometria, dependendo da velocidade de propagação da trinca, da/dN , a qual é função da solicitação cíclica no extremo da trinca, caracterizada por ΔK (amplitude do fator de intensidade de tensões) [14].

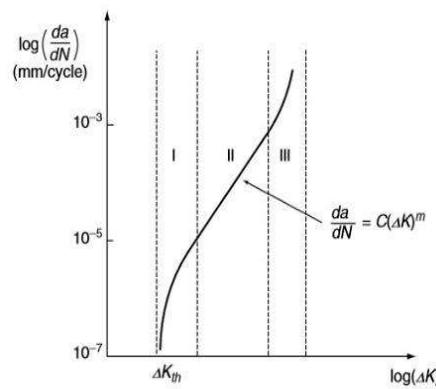
$$\Delta K = k_{max} - k_{min} = f(g)\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$$

Experimentalmente, o crescimento da trinca por ciclo de carregamento era função de ΔK atuando na ponta da trinca. Apos este, utilizou-se a variação do fator de intensidade de tensões (ΔK) para descrever a propagação das trincas de fadiga.

$$\lim_{\Delta N \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta N} = \frac{da}{dN}$$

Os dados de propagação da trinca são derivados do monitorando de sua propagação. A trinca, durante a fase inicial desenvolve-se lentamente, porém conforme aumenta de tamanho a velocidade de crescimento aumenta ocasionando à ruptura final. A velocidade de propagação, ou seja, da/dN , quando colocada em um gráfico em termos do fator de intensidade de tensão, ΔK , resulta em uma curva tipicamente da forma mostrada na Figura 6 [9].

Figura 6: Taxa de crescimento de uma trinca



Fonte: Da Rosa, 2002.

O gráfico da/dN vs ΔK apresenta três regiões bem distintas, onde os fenômenos envolvidos são diferentes.

Região I: A velocidade de propagação é lenta, da ordem de 10^{-9} m/ciclo, o que corresponde a um crescimento por ciclo sensível à microestrutura do material. Uma peculiaridade nesta região é a existência de um nível mínimo para ΔK , denominado de ΔK_{th} (*threshold*) que é o limiar da faixa do fator de intensidade de tensão abaixo da qual não ocorre crescimento de fissuras de fadiga [12].

Região II: A taxa de crescimento da trinca da/dN pode ser relacionada linearmente com a amplitude do fator de intensidade de tensões ΔK . A relação, conhecida como a lei de Paris para propagação da trinca é expressa por [15]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Onde: C são constantes típicas do material.

Algumas propriedades do material que influenciam o valor da constante: C = Módulo de elasticidade (E), Tensão limite de escoamento ($\sigma_{0,2}$), Tensão de fratura (σ_f), Deformação de fratura (ϵ_f) e Tenacidade à fratura (KIC).

Região III: Nesta região, acontece a propagação instável da trinca, que é quando ΔK é elevado e a taxa de propagação da trinca acelera. Isto acontece quando K_{max} aproxima de K_c , o qual representa o K crítico para iniciação da fratura de uma dada espessura [13].

Modos estáticos responsáveis pela fratura na região III: Microclivagem, separação intergranular e coalescimento de vazios. A microclivagem surge quando o material estiver abaixo da temperatura de transição díutil-frágil, provocando um grande aumento na velocidade de propagação. Nesta situação, a espessura do material influencia também de forma sensível, pois em chapas espessas a ruptura por microclivagem é maior, como consequência da maior restrição quanto ao desenvolvimento de deformações transversais. Se o mecanismo de ruptura é exclusivamente por formação de estrias, a espessura passa a ter um efeito muito pequeno na taxa de propagação.

Principais Fatores que influenciam a propagação da trinca de fadiga

- Influência da tensão média
- Influência da microestrutura

- Influência da espessura

Equipamentos utilizados na mineração estão em ambientes agressivos e sujeitos a condições externas, pode-se dizer que a maioria das falhas estão relacionadas à sobrecarga operacional a que os equipamentos são submetidos e à abrasividade causada pelo atrito contínuo dos componentes com o minério e fadiga estrutural, com isso possuem, em grande parte, similaridade em seus modos de falhas. Tal fato se justifica pelo meio e carga mecânica de trabalho em que os equipamentos estão inseridos.

Para iniciar os estudos sobre ensaios não destrutivos, faz-se necessário o conhecimento da classificação das falhas:

- Descontinuidades são imperfeições que não interferem imediatamente no funcionamento de um determinado item. Como exemplo temos os vazios internos formados na estrutura do material, decorrentes do processo de fundição, soldagem, dentre outros [16].

- Defeitos são desvios de uma característica de um item em relação ao seu requisito, como os vazios internos citados anteriormente não se restringem à estrutura interna e afloram para a superfície. Um defeito pode ou não, afetar a capacidade de o item desempenhar a sua função [10].

Os ensaios não destrutivos são usados para inspeção e para o monitoramento em forma de manutenção preditiva, das condições de operação das máquinas. A vantagem é a conservação do material sob teste. Existem vários tipos de ensaios não destrutivos (END), cada um com sua técnica de revelação de falhas e possibilidade de aplicação nos mais variados itens. A definição da técnica a ser usada depende também da profundidade que se espera identificar a descontinuidade ou defeito. Desta forma, pode-se aplicar as técnicas de inspeção visual, ensaio por partículas magnéticas, ensaio por líquido penetrante, ensaio por ultrassom, ensaio por radiografia, dentre outros.

O ensaio de líquido penetrante é um método não destrutivo usado para detectar trincas, porosidades ou outras descontinuidades superficiais em materiais não porosos. É realizado aplicando-se um líquido penetrante na

superfície do material devidamente limpo e depois removendo o excesso, após um período, denominado tempo de penetração, aplica-se um revelador que permite a visualização das descontinuidades. O líquido penetrante entra nas descontinuidades e é extraído para a superfície por ação capilar quando o revelador é aplicado conforme demonstrado na Figura 8, não requer equipamentos complexos ou muito caros e pode ser realizado em qualquer lugar. Este processo permite detectar descontinuidades superficiais que podem ser ignoradas em inspeções visuais, aumentando a confiabilidade das peças/componentes [17].

Figura 8: Aplicação de líquido penetrante



Fonte: UTDK, 2012

Pode ser utilizado para inspeção de soldas, fundições, forjados, propagação de trinca, entre outros. Suas aplicações também se estendem à manutenção, por exemplo, na detecção de trincas em componentes. Na engenharia, o uso do método de memória de cálculo complementa esta técnica, permitindo que os profissionais antecipem possíveis problemas e definam ações corretivas, tornando o processo mais eficiente. O processo do ensaio de líquido penetrante começa com a limpeza da superfície da peça a ser inspecionada para remover sujeira, óleo, graxa ou qualquer outra substância que possa impedir o contato direto do penetrante com a superfície. Uma vez limpa, a superfície é seca e o líquido penetrante é aplicado. Após o período de penetração, o excesso de líquido penetrante é removido da superfície, cuidando para não remover o líquido das descontinuidades. Em seguida, aplica-se o revelador, que extrai o penetrante

das descontinuidades, tornando-as visíveis a olho nu ou sob luz UV [18].

A interpretação dos resultados do ensaio de líquido penetrante é uma habilidade técnica que requer treinamento. A eficácia deste ensaio depende da experiência e conhecimento do operador. As indicações produzidas na superfície após a aplicação do revelador podem variar em intensidade, cor, tamanho e forma. O operador, com base em sua experiência e conhecimento, deve ser capaz de distinguir entre indicações verdadeiras e falsas. Indicações verdadeiras normalmente têm formas regulares, como círculos e linhas, indicando a presença de trincas ou porosidades, enquanto indicações falsas tendem a ser irregulares, indicando a presença de sujeira ou resíduos na superfície.

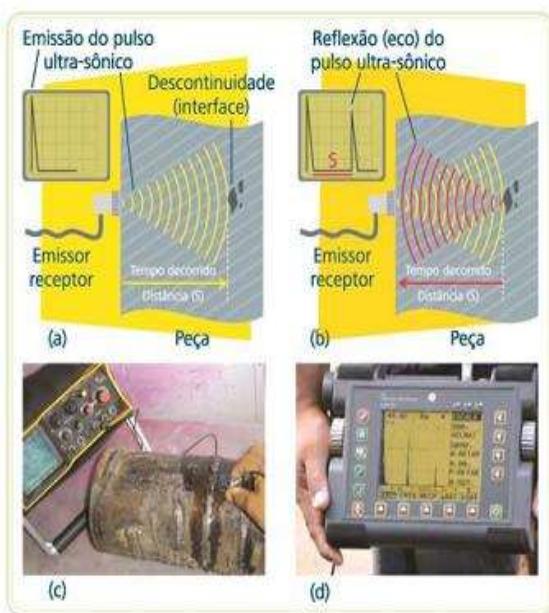
Em suma, o ensaio de líquido penetrante desempenha um papel crucial na manutenção da integridade e segurança de componentes e estruturas em diversas indústrias. Utilizando princípios simples, este método efetivamente detecta falhas superficiais que poderiam levar a falhas catastróficas. Assim, a compreensão de como realizar e interpretar corretamente um ensaio de líquido penetrante é uma habilidade valiosa para engenheiros, técnicos e outros profissionais [17].

O ensaio por ultrassom é um outro método não destrutivo que tem como finalidade, a detecção de defeitos ou descontinuidades internas nos mais variados tipos ou formas de materiais ferrosos ou não ferrosos [16].

Os cristais piezelétricos são materiais que têm capacidade de converter pressão mecânica em tensão elétrica e vice-versa. Eles são usados nos transdutores para converter um tipo de energia em outra. Neste caso, converte a energia elétrica de excitação em energia mecânica de vibração com a mesma frequência da energia elétrica. O ensaio de ultrassom caracteriza-se pela reflexão de ondas acústicas quando encontram obstáculos à sua propagação, dentro do material. Tais obstáculos podem ser interpretados como possíveis descontinuidades na peça avaliada. A instrumentação utilizada no ensaio de ultrassom é composta de transdutores além de um

acoplante e de um receptor de sinal. O método ultrassônico possui alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas como trincas, fissuras, porosidade e outros defeitos de difícil detecção. O ensaio ultrassônico não requer planos especiais de segurança ou qualquer acessório para aplicação [19].

Figura 9: Exemplo do ensaio por ultrassom



Fonte: Zolin, 2011

O ensaio por ultrassom baseia-se na propagação de ondas mecânicas e na medição do tempo de voo do pulso refletido para calcular a localização de descontinuidades, utilizando relações trigonométricas entre o ângulo de incidência, a velocidade da onda e a profundidade do defeito [19].

O valor da distância entre o ponto da trinca e a superfície da peça pode ser calculado pelas equações:

$$\Delta l = \frac{c \Delta t}{2} \quad (1)$$

$$d = \frac{c \Delta t}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

Onde:

CS = Velocidade de incidência da onda.

Δt = É a diferença entre o tempo de reflexão e difração da onda.

Two-way (Tempo de percurso) TOF a partir de L :

$$TOF_2 = \frac{2L}{c} \quad (3)$$

Distância one-way corrigida:

$$L_{corr} = \frac{c \cdot TOF_{corr}}{2} \quad (4)$$

Profundidade perpendicular à superfície:

$$d = L_{corr} \cos (\theta) \quad (5)$$

Como fatores limitantes ao ensaio, pode-se citar a necessidade de grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor. Faixas de espessura muito finas constituem uma dificuldade para aplicação do método e requer um reparo e relativo grau de acabamento da superfície para sua aplicação [20].

METODOLOGIA

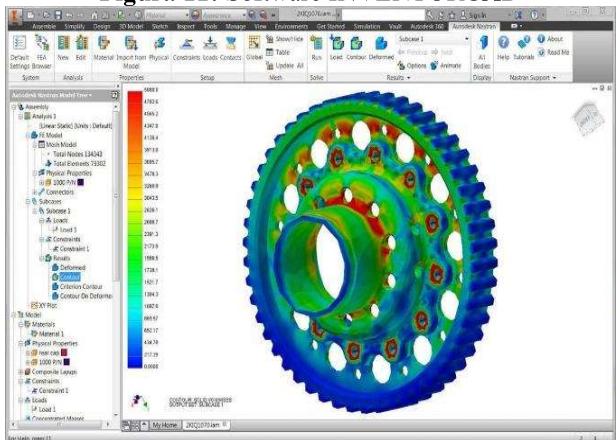
A metodologia desenvolvida para este trabalho está representada pelo fluxograma da Figura 10:

Figura 10: Fluxograma.



Fonte: Próprio autor, 2025

O Autodesk INVENTORCAD, demonstrado na Figura 11, é um software de modelagem 3D utilizado no desenvolvimento de peças e montagens mecânicas. Ele permite criar protótipos virtuais, detectar interferências e gerar desenhos técnicos com precisão, sendo ideal para a fase de projeto [21].

Figura 11: Software INVENTORCAD


Fonte: Archi Expo, 2025.

A partir do desenho e modelagem 3D, realizado no software INVENTORCAD, da roda de caçamba e da retomadora como um todo, conforme mostrado na Figura 12, foi realizada uma análise detalhada da estrutura com o objetivo de identificar as junções/ uniões da roda de caçamba que está sendo estudado.

Figura 12: Visão geral da modelagem 3D


Fonte: Engenheiro Paulo Andrade, 2025.

O equipamento escolhido para realizar o estudo é uma recuperadora de minério em operação em uma unidade de mineração de Níquel, conforme ilustrado na Figura 13. A recuperadora está em operação desde 2012 e teve uma reforma estrutural em 2015, sua capacidade de produção definida em projeto é de 11.620 T/h. Este equipamento é constituído de 11 caçambas distribuídas em uma roda com diâmetro externo de 9.785 mm que é acionada por um motor elétrico sob a rotação de 4,5 RPM. O material da caçamba é o aço estrutural ASTM A572.

Figura 13: Retomadora de minério


Fonte: Próprio autor, 2025

A fim de analisar o comportamento estrutural e mecânico da roda de caçamba da recuperadora de minério em serviço sob fadiga citada anteriormente, foi realizado ensaios não destrutivos para a mensuração do comprimento da trinca encontrada durante inspeções sensitivas na roda de caçamba. Aproveitou-se de uma parada para manutenção preventiva, para posicionamento da roda de caçamba na região trincada e executar o ensaio de Líquido penetrante e ultrassom, como visto na Figura 14, a fim de mapear trincas e sua propagação. A mesma demonstra, através do ponto vermelho destacado, a região escolhida para realização do END – Ultrassom/ LP.

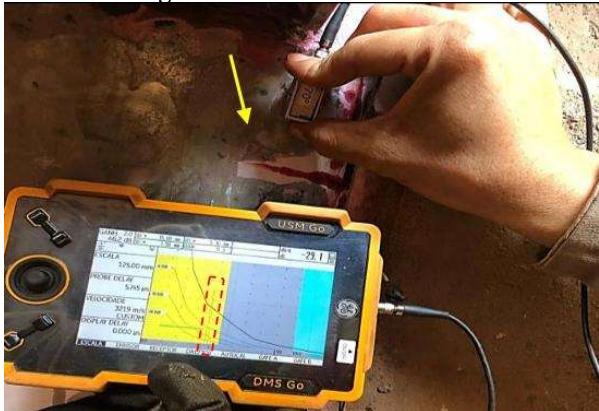
Antes da realização do ensaio não destrutivo por ultrassom foi realizado a END de líquido penetrante (LP), utilizando 2 tipos de líquidos, o primeiro seria o penetrante VP-30 e o segundo um revelador D70 ambos fabricados pela Metal-Chek, LT 23-00308 e LT 23-0333 respectivamente, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14: Penetrante e revelador.


Fonte: Próprio autor, 2025.

O equipamento usado para o ensaio não destrutivo de ultrassom foi um USMGO– N0. SÉRIE: 12126091, do fabricante GE, demonstrado na Figura 15.

Figura 15: Ultrassom USMGO



Fonte: Próprio autor, 2025.

RESULTADOS

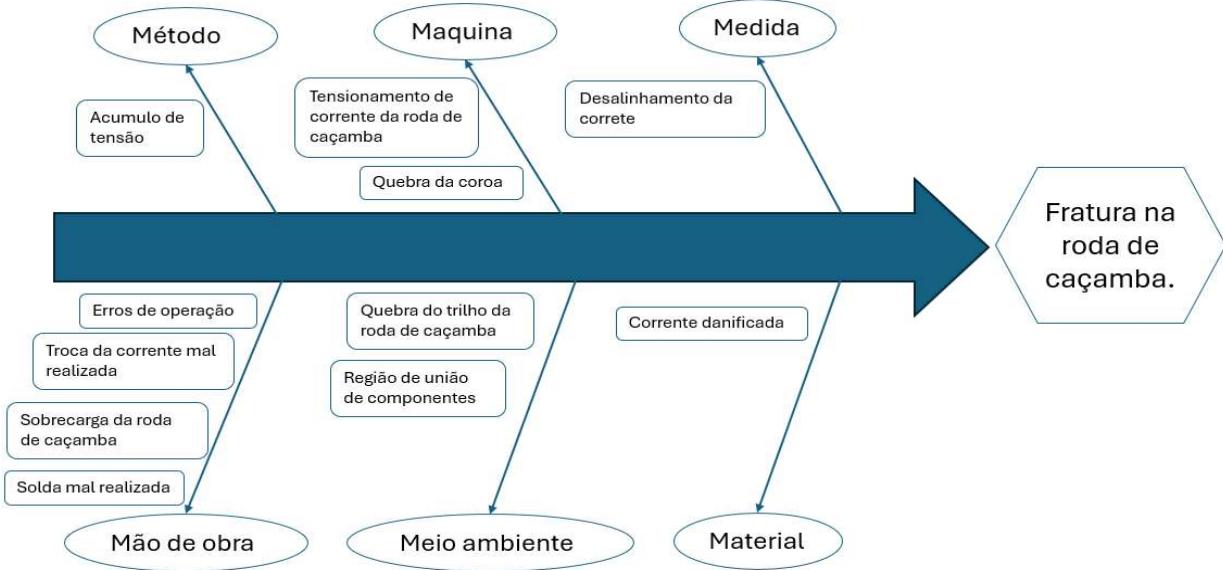
Com base no levantamento de dados, listando cada uma das ideias levantadas em relação às possíveis causas utilizando o histórico de paradas do ativo, aplicadas

ferramentas do MASP (Método de Análise e Solução de Problemas) com o propósito de identificar se há outras causas raízes para o fenômeno, algumas das possíveis causas apontadas foram:

- Sobrecarga da roda de caçamba;
- Desalinhamento da corrente;
- Quebra da coroa;
- Tensionamento de corrente da roda de caçamba;
- Troca da corrente mal realizada;
- Quebra do trilho da roda de caçamba;
- Solda mal realizada;
- Corrente danificada;
- Região de união de componentes;
- Utilização do elétrodo revestido para a solda.

A partir das informações levantadas, filtrou-se aquilo que realmente é pertinente de acordo com a situação descrita. Desse modo, classificou-se as possíveis causas apontadas, nas suas respectivas naturezas, resultando no diagrama de causa e efeito apresentado na Figura 16:

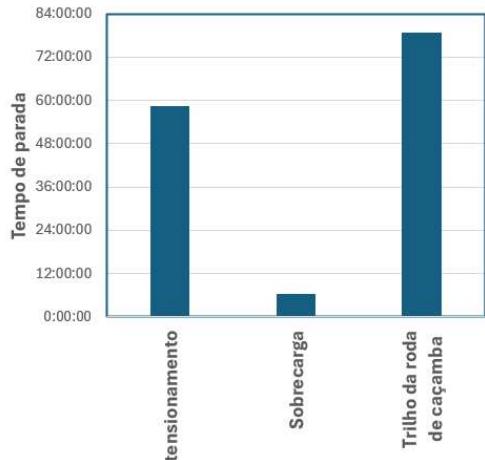
Figura 16: Diagrama de causa e Efeito



Fonte: Próprio Autor, 2025

A fim de analisar com maior precisão as possíveis causas mapeadas e entender se realmente são causas prováveis, elaborou-se um levantamento da quantidade de

paradas oriundas das mesmas no último ano e o acúmulo em horas que essas paradas ou causas geraram para o ativo, visto no Gráfico 1.

Gráfico 1: Levantamento dos tempos de paradas

Fonte: Próprio autor, 2025

Com isso entende-se que devido à pequena quantidade de paradas por sobrecargas, ela se torna pouco provável, porém não se elimina para visto que é um acumulador de tensão, às causadas pelo tensionamento da corrente de acionamento são tempos relevantes, porém não afeta diretamente a região e paradas do trilho de translação da roda, esta em uma região distintas da falha, o que explica a baixa probabilidade de serem uma das causas principais.

Após concluir quais as possíveis causas e relacioná-las às suas respectivas naturezas, é importante definir quais delas são prováveis de acontecer, e quais delas são pouco prováveis, todo cenário é analisado, a forma como o ativo é gerido, o nível de consistência do setor de manutenção, por exemplo, em uma indústria com plano de preditiva, lubrificação e inspeção do equipamento é muito bem detalhado, aplicado e controlado, é pouco provável que haja deficiência na lubrificação do equipamento.

Tabela 1: Causas possíveis de falhas.

Nº	Causas prováveis
5	Região de união de componentes; Acúmulo de tensão.
4	Quebra da coroa;
3	Tensionamento de corrente da roda de caçamba; Desalinhamento da correia. Quebra do trilho da roda de caçamba.
2	Troca da corrente mal realizada; Corrente danificada.
1	Erros de operação. Sobrecarga da roda de caçamba;

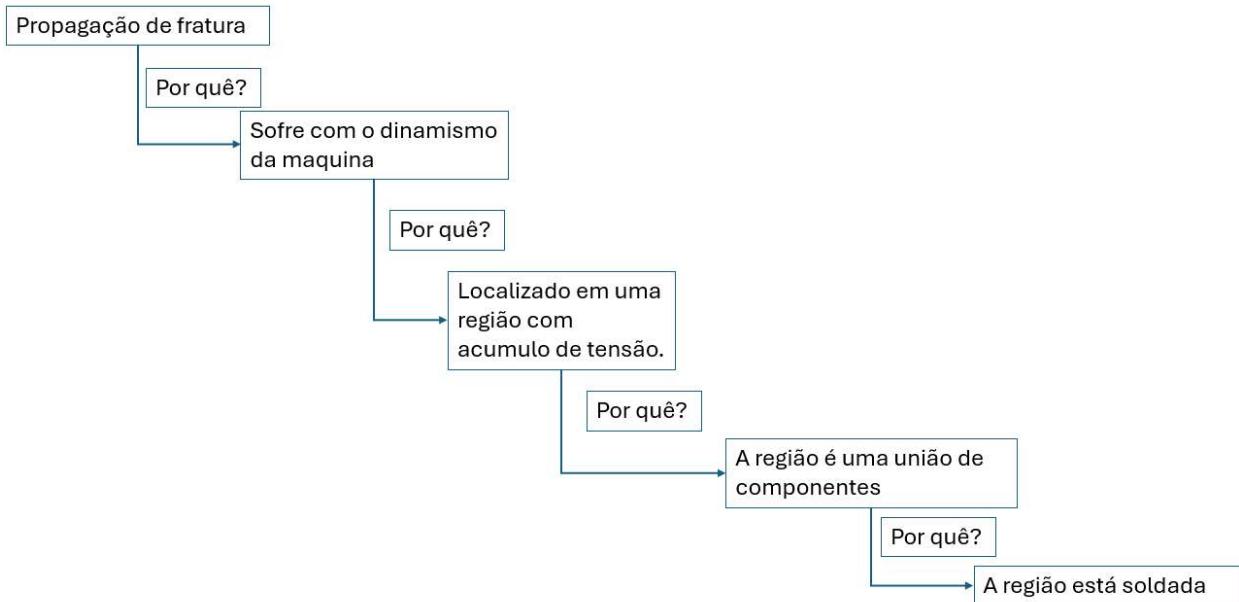
Fonte: próprio autor, 2025.

A Tabela 1 nos informa sobre as causas mais prováveis a menos prováveis de estarem gerando a trinca na roda de caçamba da retomadora baseado em dados e técnicas de tempestades de ideias. A listagem é enumerada de 1 a 5 baseada em probabilidade, sendo o 1 menos provável e a 5 mais provável.

Conforme mencionado anteriormente a sobrecarga se torna pouco provável devido a baixa quantidade de incidentes das mesmas, as causas por correntes e quebra do trilho se tornam pouco provável devido a estarem em regiões distintas da falha.

Ao pesquisar sobre os dados de quebra da coroa foi encontrado pouco detalhamento sobre a mesma, o que deixa difícil de analisar como uma causa. Foi necessário colocar como uma causa menos provável, porém é necessário investigar em outros estudos, pois é um componente que tem uma grande relação com a estrutura da roda de caçamba.

Com o mesmo objetivo de identificar a causa raiz ou refinar/eliminar as causas que levou a propagação de trinca, utilizou-se da técnica dos porquês demonstrado na Figura 17. Através de uma sequência lógica de porquês, chegou-se à suposta causa raiz do problema, onde através de maneira lógica e conhecimento técnico busca entender o porque está ocorrendo determinado evento, a primeira pergunta seria o porque a propagação de fratura ocorre, responde-se que é uma região que sofre com a dinâmica da máquina, entende-se que sofre com a dinâmica da máquina porque se encontra em uma região com acúmulo de tensão, visto que se encontra em uma região de união de componentes e por fim entende-se que a região está soldada o que enriqueceu a região.

Figura 17: Diagrama dos 4 Porquê.


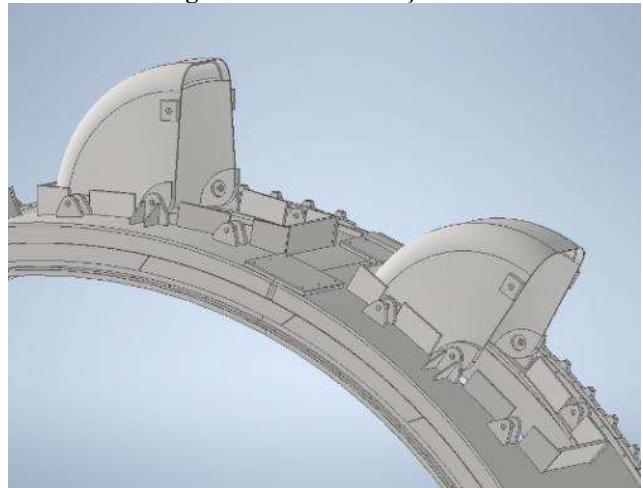
Fonte: Próprio Autor, 2025

A fim de buscar um melhor entendimento de onde a falha se encontra, foi estudado a estrutura em um modelamento 3D já existente, primeiramente entendendo o que é a roda de caçamba, conforme mostrado na Figura 18 a roda é um grande componente da retomadora a fim de movimentar as caçambas na pilha de minério.

Figura 18: Roda de caçamba.

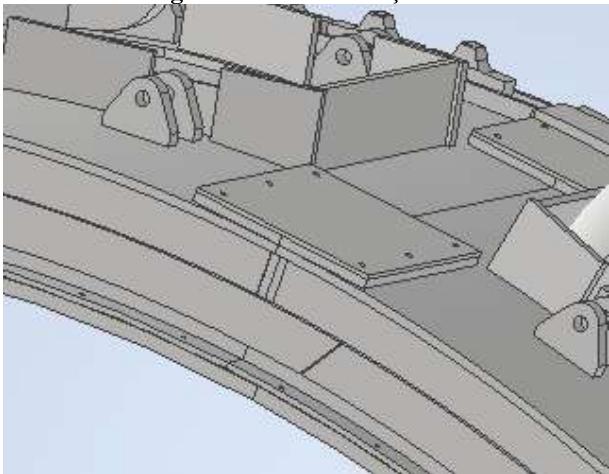

Fonte: Engenheiro Paulo Andrade, 2025.

Após entendermos a roda de caçamba, foi realizado uma amplificação na região que se encontra a propagação de trinca, onde é possível visualizar que se trata de uma união entre duas estruturas, conforme demonstrado na Figura 19.

Figura 19: Roda de caçamba.


Fonte: Engenheiro Paulo Andrade, 2025.

Regiões de união costumam ter uma concentração de tensão maior devido a movimentação de seus componentes e por serem fim de percurso da estrutura, gerando assim um maior estresse para o material [23].

Figura 20: Roda de caçamba.


Fonte: Engenheiro Paulo Andrade, 2025.

Na Figura 20 é possível visualizar a união citada anteriormente mais próxima. Acima da união há uma placa de junção das peças, com o objetivo de dissipar o acúmulo de tesão da região e proteger a região.

Após visualizar e entender com detalhamento a região afetada se fez necessário o entendimento do relatório do inspetor de ensaio não destrutivos, realizado em 10 de fevereiro de 2025, ele destaca pontos demonstrados posteriormente.

Figura 21: Roda de caçamba.


Fonte: Próprio autor, 2025

Na Figura 21 é possível visualizar com detalhes a região ensaiada em sua operação diária, a referência utilizada para identificação do ponto correto foi a numeração na caçamba e no ponto de fixação da mesma que está circulado em vermelho na mesma Figura 19, ou seja, em condições produtivas e antes de realizar o tratamento da estrutura para o ensaio, na Figura 22

podemos visualizar a mesma região com mais enfoque, porém com o tratamento superficial já realizado.

Figura 22: Região ensaiada após tratamento

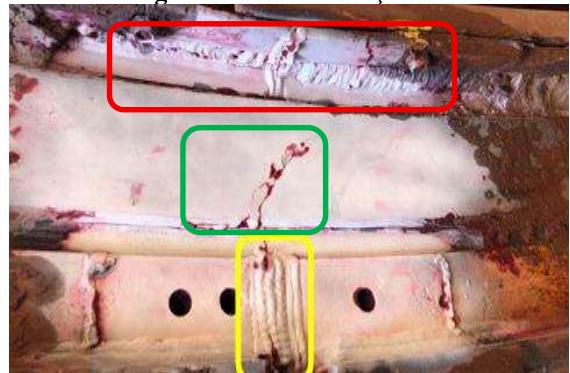

Fonte: Próprio autor, 2025

Na Figura 23 é demonstrado a aplicação do líquido penetrante na região citada, para que se possa aguardar o tempo de penetração e após aplicar o revelador.

Figura 23: Aplicação do líquido penetrante.

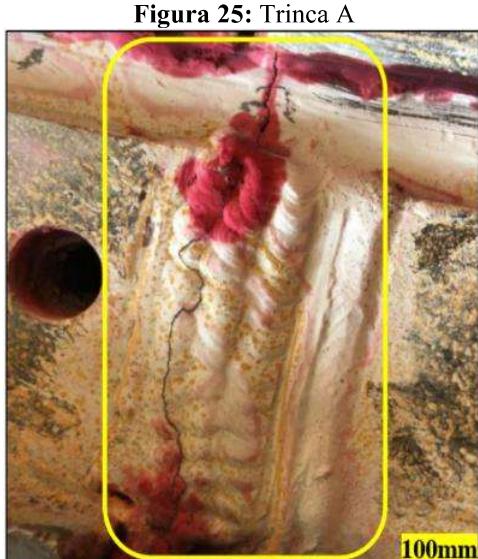

Fonte: Próprio autor, 2025

Com a aplicação do revelador foi possível identificar três campos de propagação de trinca na região lateral da roda de caçamba, conforme visto na Figura 23.

Figura 24: Roda de caçamba.


Fonte: Próprio autor, 2025

Ao detalhar cada defeito encontrado foi possível notar pontos específicos de cada um deles, para compreender melhor foi destacado em amarelo a trinca nomeada como A, em verde a trinca nomeada como B e em vermelho a trinca nomeada como C.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Na trinca A apresentada na Figura 25 nota-se que está sobre uma região soldada por camadas, localizada em uma união de dois componentes conforme analisada em desenhos e foi uma propagação continua. Nesta inspeção preliminar, foi possível identificada uma abertura com aproximadamente 100 mm de comprimento.



Fonte: Próprio autor, 2025

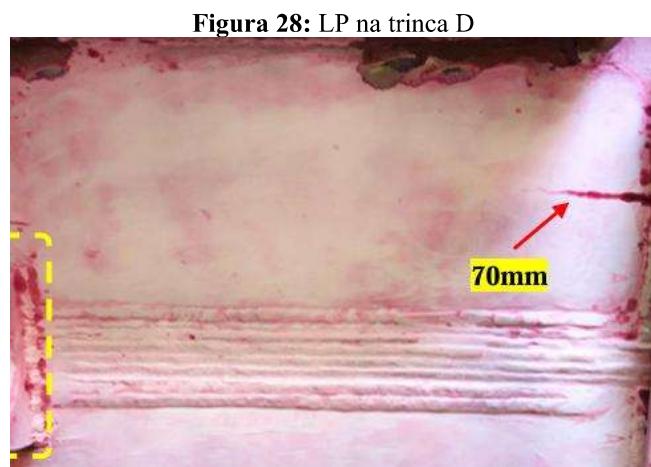
A trinca B, apresentada na Figura 26, localizada logo após a trinca A sobre solda, apresentou propagação ao longo da estrutura da roda de caçamba, diferenciando-se da anterior, atingindo um comprimento de aproximadamente 115 mm.



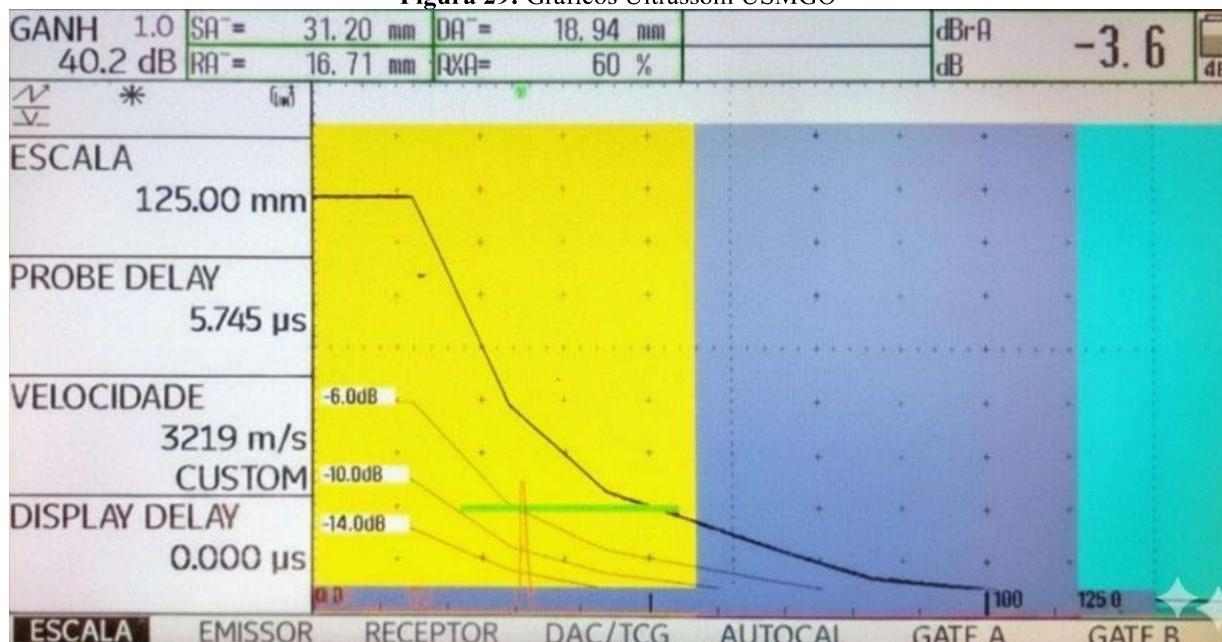
Fonte: Próprio autor, 2025

Na sequência da evolução do dano, constatou-se a ocorrência da Trinca C apresentada na Figura 27, transladada da Trinca B da estrutura para a chapa superior. Durante a inspeção, verificou-se que, além da mudança de posição, houve um aumento significativo de seu comprimento, atingindo atualmente 250 mm.

Ao dar continuidade na inspeção, foi realizado o ensaio sobre a continuidade da região de união soldada e identificado uma propagação em paralelo ao estudo da região soldada em questão, mas diretamente ligada a estrutura da roda de caçamba.



Fonte: Próprio autor, 2025

Figura 29: Gráficos Ultrassom USMGO


Fonte: Próprio autor, 2025

O defeito destacado por LP mostrado na Figura 28 e dimensionado por ultrassom, por se tratar de um defeito que foi encontrado no meio de uma chapa, a Figura 29 demonstra o ultrassom para determinação do fim da ponta da trinca, obteve-se uma espessura de 20 mm, trinca detectada superficialmente e até 15 mm de profundidade.

A Figura 29 mostra um A-Scan, um sinal ultrassônico em função do tempo, onde o eixo horizontal representa o tempo de percurso do pulso, convertido em profundidade com base na velocidade do som percorrida no material, e o eixo vertical representa a amplitude do eco (intensidade do sinal refletido). As áreas coloridas ajudam a delimitar janelas de inspeção (gates), portanto a amarela corresponde ao campo próximo do transdutor (eco superficial ou de acoplamento), o azul claro (Gate A) é a primeira janela de detecção, usada para medir ecos principais (possíveis defeitos), e o cinza/azul (Gate B) é a segunda janela, usada para ecos posteriores (fundo da peça, segunda parede etc.).

Os parâmetros principais à esquerda, a ESCALA em 125 mm é a profundidade máxima exibida

na tela, o PROBE DELAY, em 5.748 µs), é o tempo morto do transdutor é o período entre o disparo e o início da leitura útil, a velocidade de 3229 m/s é a velocidade do som no material inspecionado. O Display Delay, em 0 µs indica que o início da escala coincide com o início da leitura útil.

As curvas observadas na Figura 27, com valores como 5.60 e 15.60, correspondem às trajetórias dos ecos ou curvas de correção angular, usadas em sondas angulares. O traço preto principal é o eco recebido, quando é detectado, indica que um possível refletor (defeito, solda, descontinuidade) está sendo visto naquela profundidade.

No canto superior direito, o valor de -29.1 dB, é o nível de atenuação ou ganho aplicado ao sinal. Esse valor regula a sensibilidade, e se aumentar o ganho, ecos menores se tornam visíveis.

Foi necessário calcular a profundidade através das seguintes equações:

Primeiro calcula-se o tempo de percurso (TOF) a partir de L conforme a fórmula 3:

$$TOF_2 = \frac{2L}{c} = \frac{2 \cdot 0,06308}{3229} = 39,07 \mu s$$

Subtraindo o probe delay para corrigir o tempo utilizando a fórmula 3:

$$\text{TOF}_{corr} = 39,0709 - 5,748 = 33,32 \mu\text{s}$$

A distância one-way corrigida utilizando a fórmula 4:

$$L_{corr} = \frac{c \cdot \text{TOF}_{corr}}{2} = \frac{3229 \cdot 33,3229 \times 10^{-6}}{2}$$

$$\approx 53,8 \text{ mm}$$

Profundidade perpendicular à superfície para ângulo $\theta = 70^\circ$ utilizando a fórmula 5:

$$d = L_{corr} \cos(70^\circ) \approx 53,8 \times \cos(70^\circ)$$

$$d \approx 18,40 \text{ mm}$$

Para melhor agilidade no planejamento do reparo da falha observada, foi informando o tamanho de comprimento em visual externo é de 70 mm e a profundidade visto em ultrassom é 20 mm.

Ao analisar a região na Figura 30 observa-se que a trinca ocorreu na região soldada e na ZTA (Zona Termicamente Afetada), indicando que a técnica ou a qualidade da soldagem utilizada não foi a mais adequada para aquela região.

Após as análises preliminares das técnicas utilizada, foi visto a necessário de avaliar com mais detalhe os defeitos presentes na junção da roda de caçamba, devido as características do defeito e a região ser de difícil compreensão, devido a isso foi solicitado um novo ensaio não destrutivo, realizado em 22 de outubro de 2025. Pediu-se a abertura das chapas de proteção para visualização e ensaio em toda a região soldada. Conforme avaliado anteriormente, se trata de uma região parafusada e soldada, tendo a possibilidade da fundição dos parafusos na estrutura, deixando obsoleto a sua função primaria de absorção de tensão e fusível mecânico, pode-se visualizar as características comentada na Figura 30.

Figura 30: Região ensaiada.



Fonte: próprio autor, 2025.

A figura 31 mostra com maior precisão e detalhamento a trinca passante identificada no novo ensaio.

Figura 31: Região ensaiada.



Fonte: próprio autor, 2025.

A análise se concentra na junção que faz referência ao ponto de fixação 10, conforme detalhado na seção Resultados. É crucial notar que a roda de caçamba possui três regiões de união/junções semelhantes, e todas estão apresentando o mesmo modo de falha. Devido à recorrência da falha, essas junções necessitam de um monitoramento de condição constante para detectar e impedir o crescimento da trinca estudada, garantindo a segurança e a disponibilidade do equipamento.

Conforme visto na Figura 31 a trinca é passante, ou seja, atravessa a placa em questão de 125

mm, com isso não foi necessário realizar um novo ensaio de ultrassom para novas determinações de profundidade, e visto que não se tinha novas regiões lisas para realizar o ensaio.

Entende-se que a região estudada possui soldas por eléktrodo revestido, que é indicado para áreas de difícil acesso, como é o caso do componente em questão, a técnica se mostra incapaz de suportar o acúmulo de tensões gerado podendo ser uma das causas do modo de falha [22].

A partir dos levantamentos e análises realizadas algumas ações imediatas são necessárias, dentre eles podemos citar um tratamento adequado na junta existente. Por meio da técnica de esmerilhamento, deve ser realizado o trabalho com camadas finas para que não ocorra cortes na superfície do aço. Após o procedimento é aconselhado a utilização de uma lima para dar acabamento final e ter uma face com maior aprimoramento completo do cordão de solda anterior, essa etapa visa remover todo o material previamente aplicado, uma vez que o contato entre os materiais antigos pode comprometer a qualidade da nova soldagem proposta.

Dentre as ações recomendadas para evitar futuras fraturas seria o tipo de solda a ser aplicada, o mais indicado para este tipo de aplicação é o método MIG (Metal Inert Gás). Este processo utiliza um gás de proteção inerte, geralmente aplicado em metais não ferrosos no entanto o aço ASTM A57 é um metal ferroso e por empregar o arame eléktrodo de níquel AWS ERNi-1 o gás inerte da técnica auxilia na anti oxidação do níquel. Considerando que o material utilizado para fabricação da retomadora é o ASTM A572, sendo o mesmo que a técnica é indicada, recomenda-se a utilização do método MIG em uma nova ação de reparo com o objetivo de alcançar uma maior capacidade em suportar cargas e impactos, mesmo com o uso de um consumível de maior valor agregado. Além disso, recomenda-se o monitoramento contínuo da estrutura

após a nova soldagem, a fim de verificar seu desempenho sob condições reais de operação.

É importante avaliar tecnicamente a viabilidade de um reprojeto estrutural da retomadora, o reprojeto permitirá uma redistribuição mais adequada dos esforços, além da otimização geométrica e material do componente, visando maior confiabilidade e segurança durante o ciclo de operação do ativo.

Porém, mesmo com as ações de tratamento superficial e novas técnicas de soldagem, faz-se necessário a reavaliação da necessidade de solda na região estudada, por se tratar de uma região parafusada. Os parafusos têm o objetivo absorver as tensões e ser um fusível mecânico, com a ausência deles pode-se estar distribuindo essa tensão para a solda e estrutura da roda de caçamba da retomadora.

Mesmo com as causas definidos e ações sugeridas o estudo levantou pontos de atenção e observações importantes para outras situações que vem acontecendo com a retomadora, como por exemplo, a quantidade de paradas por tensionamento de corrente e paradas por reparo nos trilhos, os mesmos são necessários ser mais investigados em outros estudos com o objetivo de compreender com mais detalhamento os impactos que essas paradas e falhas estão trazendo e gerando a roda de caçamba da retomadora e ao sistema como um todo.

CONCLUSÃO

Com base em estudos técnicos realizados neste trabalho, foi possível compreender as possíveis causas e o fenômeno que estava acontecendo em um falha, ou seja, por uma trinca localizada na região na junção da roda de caçamba de uma retomadora, equipamento essencial para a homogeneização e recuperação de minério para beneficiamento em mineradoras, estudando os desenhos técnicos foi possível entender o componente, antes de avaliar pelos ensaios não destrutivos, nos quais indicaram trincas no cordão de

solda e na ZTA (zona termicamente afetada). Com isso, as causas mais prováveis, pelo modo de falha presente na união da roda de caçamba da retomadora, é a região de acúmulo de tensão e o processo de soldagem realizado.

A fim de levantar mais possibilidades e avaliar as mesmas utilizou-se técnicas do MASP (metodologia de análise e solução de problemas). O diagrama de causa e efeito ajudou a entender a natureza das possíveis causas levantadas por dados de paradas. Por outro lado, o levantamento do tempo de parada de algumas das possíveis causas facilitou o entendimento de uma causa menos provável, por ter pouco índice de paradas, e a natureza de outras duas contribui em classificar em menos provável, por se encontrarem em regiões distintas. Por fim o diagrama dos 4 por quês liga as causas e entende que uma coisa leva a outra, indicando novamente a solda como a principal causa.

Contudo, o estudo teve o objetivo de realizar análise técnica de uma região que apresentava uma falha, com técnicas simples e amplamente aplicada na indústria, pode-se verificar o comportamento da falha e deduzir modos de falhas, além de sugerir ações de mitigação, ou seja, ações imediatas e ações para longo prazo, porém gerou-se pontos de atenção para outras situações que havia acontecendo com o ativo e que são importantes se preocupar e realizar ações prevencionistas nesses pontos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Xenos, Harilaos G. **Processos de manutenção: planejamento, controle e avaliação.** 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001;
2. Pellicone, Andre da Silva e Silva, Paulo Sérgio Carvalho Pereira da. **Análise de falhas: Trinca e fraturas em equipamentos mecânicos** 1^a ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2024;
3. Machado, J. M. **Planejamento Baseado em Risco de Inspeção à Fadiga em Unidades Estacionárias de Produção**, Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002;
4. Mundo Educação. **Níquel**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/niquel.htm>. Acesso em: 6 abr. 2025;
5. Kalenborn Do Brasil. **Conheça as caçambas retomadoras.** Kalenborn do Brasil, Vespasiano, 21 fev. 2024. Disponível em: <https://kalenborn.com.br/cacambas-retomadoras/>. Acesso em: 2 maio 2025;
6. Moreira, Werley Lopes, **Estudo de propagação de trinca por fadiga nas caçambas de recuperadoras de minério.** UFMG, 06/08/2018;
7. Morais, Carlos Antonio de. **Processos físicos e químicos utilizados na indústria mineral.** 8^a ed, 2014;
8. Teixeira, Ricardo Santos. **Metodologia de análise de fadiga em componentes estruturais de aço baseada na mecânica da fratura.** Escola de engenharia da UFMG, 28/03/2004;
9. Da Rosa, E. **Análise da Resistência Mecânica, Mecânica da Fratura e Fadiga,** out, 2002;
10. Associação Brasileira De Normas Técnicas **NBR 5462 – Confiabilidade e manutenibilidade**, 1994;
11. Zolin, I. **Ensaios Mecânicos e Análise de Falhas**, p. 15-32, 2011;
12. Norton, R.L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**, p. 293-387, 2006;
13. Lee, Y.; Pan J.; Hathaway R.; Barkey M. **Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice)**, USA, 2005;