



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA ACR APLICADA A FALHA DE UMA EMBREAGEM DE  
DIREÇÃO E FREIO DE UM TRATOR DE ESTEIRAS**

**LUCAS MIKAELL VITÓRIO DA SILVEIRA**

**TUCURUÍ – PA  
2021**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA ACR APLICADA A FALHA DE UMA EMBREAGEM DE  
DIREÇÃO E FREIO DE UM TRATOR DE ESTEIRAS**

**LUCAS MIKAELL VITÓRIO DA SILVEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

**Orientador:**

**Prof. Msc. Maciel da Costa Furtado**

**TUCURUÍ – PA  
2021**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

S587m Silveira, Lucas Mikael Vitório da.  
Metodologia ACR aplicada a falha de uma embreagem de  
direção e freio de um trator de esteiras / Lucas Mikael Vitório da  
Silveira. — 2021.  
84 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Maciel da Costa Furtado  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade  
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de  
Engenharia Mecânica, Tucuruí, 2021.

1. Manutenção. 2. Análise de Falhas. 3. Causa Raiz. I.  
Título.

CDD 620.0046

---



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITARIO DE TUCURUI

ATA Nº 1318 / 2021 - CTUCU (11.16)

Nº do Protocolo: 23073.036845/2021-18

Tucuruí-PA, 27 de setembro de 2021.

**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA ACR APLICADA A FALHA DE UMA EMBREAGEM DE DIREÇÃO  
E FREIO DE UM TRATOR DE ESTEIRAS**

**LUCAS MIKAELL VITÓRIO DA SILVEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

**Conceito: Excelente  
Tucuruí-PA, 27 de setembro de 2021**

BANCA EXAMINADORA:

*(Assinado digitalmente em 27/09/2021 15:50)*  
DOUGLAS NEVES GARCIA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
CTUCU (11.16)  
Matrícula: 1870088

*(Assinado digitalmente em 27/09/2021 12:48)*  
MACIEL DA COSTA FURTADO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
CTUCU (11.16)  
Matrícula: 1103308

*(Assinado digitalmente em 27/09/2021 13:34)*  
WASSIM RAJA EL BANNA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
NDAE (11.16.16)  
Matrícula: 2985805

Para verificar a autenticidade deste documento entre em  
<https://sipac.ufpa.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **1318**, ano: **2021**, tipo:  
ATA, data de emissão: **27/09/2021** e o código de verificação: **4fda227b43**

*Dedico este trabalho a pessoa que mais amei nessa vida,  
minha falecida avó e mãe, Lindalva Conceição da Silveira,  
a qual me criou e sonhava em presenciar o momento  
em que eu viesse a concluir minha graduação...*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me abençoar grandemente e sempre me dar forças para continuar.

Ao meu pai, Edigleuson Silveira, por todo amor, toda a assistência e confiança.

Aos meus tios(as), Rose Vitorio e Bruno Gonçalves, pelo apoio moral, pelo carinho e incentivo a minha pessoa.

Aos meus familiares, pelas orações e as boas expectativas colocadas em mim.

Aos amigos, pela parceria, pelos pensamentos positivos e por toda ajuda que se propuseram a me oferecer.

A UFPA/CAMTUC, pela oportunidade de fazer o curso.

Ao meu orientador, Maciel Furtado, pela disponibilidade, pela confiança e por todo auxílio prestado durante a execução desse trabalho.

## **METODOLOGIA ACR APLICADA A FALHA DE UMA EMBREAGEM DE DIREÇÃO E FREIO DE UM TRATOR DE ESTEIRAS**

### **RESUMO**

*Na manutenção, a ocorrência de falhas em processos ou equipamentos pode comprometer os reais ganhos de uma organização, de forma que, geralmente, estas falhas acabam por impactar em seus índices de manutenções corretivas. Sendo assim, é necessário que haja o controle da recorrência dessas falhas, e para isso, deve-se então, contar com a utilização de métodos estruturados como a Análise de Causa Raiz (ACR). Com essa perspectiva, aplicou-se a metodologia ACR a uma falha de uma embreagem de direção e freio de um trator de esteiras utilizado em atividades de decapeamento em uma organização mineradora localizada no sudeste do estado do Pará. Com isso, foi possível identificar o desgaste corrosivo da válvula separadora da embreagem e o desgaste adesivo entre as superfícies dos discos de fricção e placas separadoras do conjunto de freio. Além disso, a partir de dados obtidos durante as etapas do processo analítico, foi possível identificar, com o auxílio de ferramentas, como o método dos cinco porquês e o diagrama de Ishikawa, as causas que levaram o componente a falha prematura, dentre essas, a causa raiz, sendo o armazenamento inadequado da embreagem no período que antecede sua instalação no ativo, assim como causas contribuintes como procedimento operacional desatualizado e erros humanos de execução. Dessa forma, para conter a recorrência do modo de falha identificado, elaborou-se então, um plano com ações corretivas com base no cenário final obtido com a aplicação da metodologia. Essas ações, após devida realização, foram efetivas em evitar a recorrência da falha da embreagem, dentre elas, estão a reestruturação de um novo local para armazenamento de componentes sob condições de proteção adequada, atualização do procedimento operacional de instalação da embreagem e ressaltada a importância da utilização deste documento durante as atividades de manutenção. Portanto, esse trabalho permitiu concluir que falhas complexas podem ser estratificadas através do método de análise de causa raiz em passos efetivos na identificação, não só da causa primordial do problema, como também de causas atreladas a diferentes aspectos de um processo que possam ter contribuído para a ocorrência da falha.*

**Palavras-chave:** *Manutenção, Análise, Falhas, Desgastes, Causa raiz.*

## **RCA METHODOLOGY APPLIED TO THE FAILURE OF A STEERING AND BRAKE CLUTCH OF A TRACK TYPE TRACTOR**

### **ABSTRACT**

*In maintenance, the occurrence of failures in processes or equipment can compromise the real gains of an organization, so that, generally, these failures end up impacting their corrective maintenance rates. Therefore, it is necessary to control the recurrence of these failures, and for this, it must then rely on the use of structured analytical methods, such as Root Cause Analysis (RCA). With this perspective, the ACR methodology was applied to a failure of a steering and brake clutch of a track type tractor used in desurfacing activities in a mining organization located in the southeast of the state of Pará. With that, it was possible to identify the corrosive wear of the clutch separator valve and the adhesive wear between the surfaces of the friction discs and separator plates of the brake assembly. In addition, from data obtained during the stages of the analytical process, it was possible to identify, with the aid of tools such as the five-why method and the Ishikawa diagram, the causes that led the component to premature failure, among these, the root cause, being the inadequate storage of the clutch in the period before its installation in the asset, as well as contributing causes such as outdated operating procedure and human execution errors. Thus, to contain the recurrence of the identified failure mode, a plan was then elaborated with corrective actions based on the final scenario obtained with the application of the methodology. These actions, after due performance, were effective in preventing the recurrence of clutch failure, among them are the restructuring of a new location for storage of components under adequate protection conditions, updating the operating procedure for installing the clutch and emphasizing the importance use of this document during maintenance activities. Therefore, this work allowed us to conclude that complex flaws can be stratified through the root cause analysis method in effective steps in the identification, not only of the primary cause of the problem, but also of causes tied to different aspects of a process that may have contributed to the occurrence of the failure.*

**Keywords:** *Maintenance, Analysis, Failures, Wear, Root Cause.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Relação entre pane, falha e defeito. ....	17
Figura 2. Curva potencial funcional (PF) no plano cartesiano. ....	19
Figura 3. Classificação de falhas. ....	20
Figura 4. Relação esquemática entre problema e causa raiz. ....	23
Figura 5. Tipos de erros humanos. ....	25
Figura 6. Passos para a aplicação do método dos cinco porquês. ....	27
Figura 7. Exemplo da aplicação do método dos cinco porquês. ....	27
Figura 8. Estrutura simplificada de um diagrama de Ishikawa. ....	28
Figura 9. Exemplificação da aplicação do diagrama de Ishikawa. ....	30
Tabela 1. Exemplificação da estrutura da ferramenta 5W2H. ....	34
Figura 10. Sistema tribológico. ....	35
Figura 11. Principais tipos de desgastes em superfícies. ....	36
Figura 12. Transferência de partículas no desgaste adesivo. ....	38
Figura 13. Mecanismo de formação de ranhuras a partir da partícula aderida. ....	38
Figura 14. Visualização de manchas e polimento na superfície de um pistão (A) e de rolamentos (B) em decorrência da adesão. ....	39
Figura 15. Biela de um motor com marcas de corrosão por pites. ....	40
Figura 16. Tubo de aço e cobre sob processo de desgaste corrosivo geral e galvânico. ....	41
Figura 17. Protetor térmico de um turbo compressor degradado por corrosão de alta temperatura. ....	41
Figura 18. Vista esquerda de um trator de esteiras D11. ....	43
Figura 19. Trem de força de um trator de esteiras D11. ....	44
Figura 20. Ilustração da embreagem de direção e freio acoplada ao comando final. ....	44
Figura 21. Visualização transversal de uma embreagem de direção e freio de um trator de esteiras. ....	46
Figura 22. Etapas a serem aplicadas para a identificação e contenção da falha da embreagem. ....	49
Tabela 2. Dados do evento de falha da embreagem de direção e freio. ....	50
Tabela 3. Dados de instalação e remoção da embreagem de direção e freio. ....	51
Figura 23. Local de instalação da válvula na embreagem (A). Item sob alto grau de oxidação (B). ....	52
Figura 24. Aspecto externo (A) e interno (B) da válvula separadora. ....	53

Figura 25. Integridade das vedações da embreagem. ....	53
Figura 26. Fixador (A) e pistão (B) do conjunto de direção da embreagem. ....	54
Figura 27. Fixador (A) e pistão (B) do conjunto de freio da embreagem. ....	54
Figura 28. Integridade superficial dos conjuntos de direção e freio da embreagem, respectivamente, em vista isométrica (A) e vista superior (B). ....	55
Figura 29. Medição da espessura total do conjunto de direção. ....	55
Figura 30. Medição dos itens do conjunto de direção. Disco de fricção (A). Placa separadora (B). ....	56
Figura 31. Medição dos itens do conjunto de freio. Disco de fricção (A). Placa separadora (B). ....	56
Tabela 4. Comparação das espessuras medidas dos conjuntos de direção e freio com os dados do fabricante da embreagem. ....	56
Figura 32. Discos de fricção e placas separadoras do conjunto direção com boa integridade. ....	57
Figura 33. Desgaste mediano (A) e avançado (B) nos discos de fricção do conjunto freio. ....	58
Figura 34. Placas separadoras do conjunto freio com machas escurecidas. ....	58
Figura 35. Aplicação do método dos cinco porquês ao problema. ....	60
Figura 36. Esboço dos cenários para análise em torno da origem do desgaste corrosivo da válvula separadora. ....	61
Figura 37. Galpão de armazenamento de componentes. ....	62
Figura 38. Motor Diesel (A) e Trucks (B) em região externa ao galpão de armazenamento. Trucks (B) sem isolamento adequado e com marcas de oxidação. ....	63
Figura 39. Componentes em armazenamento externo (A). Cilindros hidráulicos sem isolamento adequado e com marcas de oxidação (B). ....	63
Figura 40. Acoplamento entre uma embreagem e um comando final em um trator de esteiras. ....	64
Figura 41. Conclusão do método dos cinco porquês. ....	65
Figura 42. Diagrama de Ishikawa aplicado a falha da embreagem. ....	66
Figura 43. Diagrama de erro humano aplicado a causas contribuintes atreladas a mão de obra. ....	68
Tabela 5. Plano de ações gerado para a falha da embreagem através da ferramenta 5W1H. ..	69
Figura 44. Novo galpão estabelecido para o armazenamento de componentes. ....	70
Figura 45. Medida de isolamento aplicada aos componentes armazenados no galpão. ....	72
Figura 46. Cabeçalho do procedimento operacional de instalação de embreagem revisado. ..	73

Figura 47. Etapa de análise visual inclusa no procedimento operacional de instalação de embreagens. ....	73
Figura 48. Reunião da gerência com a equipe de manutenção no box da oficina de equipamentos móveis.....	75

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

5W1H – Five Why One How

5W2H – Five Why Two How

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACR – Análise de Causa Raiz

DF – Disponibilidade Física

DIN – Deutsches Institut für Normung

EUA – Estados Unidos da América

FMEA – Failure Mode and Effect Analysis

HC – Horas Calendário

HM – Horas de Manutenção

HSE – Health, Safety and Environment

IEC – International Electrotechnical Commission

ISO – International Organization for Standardization

kPa - Quilopascal

LCC – Life Cycle Coast

MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade

MTBF – Mean Time Between Failures

MTTR – Mean Time To Reppair

NBR – Norma Brasileira

PCM – Planejamento e Controle de Manutenção

RCA – Root Cause Analysis

RCM – Reliability Centered Maintenance

PRO – Procedimento Operacional

## LISTA DE SÍMBOLOS

% – Por cento

°C – Graus Celsius

$e$  – Base dos logaritmos neperianos

$\lambda$  – Taxa de falhas

$\mu$  – Taxa de reparos

$C(t)$  – Confiabilidade a qualquer tempo  $t$

$M(t)$  – Manutenibilidade a qualquer tempo  $t$

$t$  – Tempo previsto de operação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>16</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1	FALHAS .....	17
2.1.1	<b>Curva Potencial Funcional (PF)</b> .....	<b>18</b>
2.1.2	<b>Classificação de falhas</b> .....	<b>20</b>
2.2	ANÁLISE DE CAUSA RAÍZ (ACR) .....	22
2.2.1	<b>Tipos de causas</b> .....	<b>24</b>
2.2.2	<b>Ferramentas de Análise</b> .....	<b>26</b>
2.2.2.1	<i>Método dos cinco porquês</i> .....	26
2.2.2.2	<i>Diagrama de Ishikawa</i> .....	28
2.2.3	<b>Etapas da ACR</b> .....	<b>31</b>
2.3	DESGASTES DE SUPERFÍCIES .....	34
2.3.1	<b>Tipos de desgaste</b> .....	<b>36</b>
2.3.1.1	<i>Desgaste adesivo</i> .....	37
2.3.1.2	<i>Desgaste corrosivo</i> .....	39
2.4	EMBREAGEM DE DIREÇÃO E FREIO .....	42
2.4.1	<b>Princípio de funcionamento</b> .....	<b>45</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA ACR</b> .....	<b>48</b>
3.1	COMITÊ DE ANÁLISE .....	49
3.2	COLETA DE DADOS .....	50
3.2.1	<b>Gatilho de falha</b> .....	<b>51</b>
3.2.2	<b>Peritagem da embreagem</b> .....	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>59</b>
4.1	ANÁLISE DE CAUSAS CONTRIBUINTES E CAUSA RAIZ .....	59
4.1.1	<b>Aplicação do método dos cinco porquês</b> .....	<b>60</b>

<b>4.1.2</b>	<b>Aplicação do método de Ishikawa .....</b>	<b>66</b>
<b>4.2</b>	<b>GERAÇÃO DO PLANO DE AÇÕES.....</b>	<b>68</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Restruturação do galpão de armazenamento de componentes .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Garantir boas práticas e condições adequadas de armazenamento de componentes .....</b>	<b>71</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Revisão do procedimento operacional de instalação de embreagens.....</b>	<b>72</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Garantir uso do procedimento operacional e verificação prévia das condições de componentes antes da instalação .....</b>	<b>74</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>78</b>
	APÊNDICE A – Valores de medições para os discos e placas dos conjuntos de direção e freio da embreagem após a falha.....	82
	ANEXO A – Especificações do fabricante para a espessura dos itens dos conjuntos de direção e freio da embreagem. ....	83

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico impulsionado pelas indústrias no século XX impuseram grandes desafios para as organizações mundiais, de modo que, a qualidade do produto se tornaria requisito básico. Mesmo que grandes empresas se respaldem com sistemas de gestão de qualidade, mão de obra qualificada, acesso as demais tecnologias de conhecimento e uma estrutura propícia ao não surgimento de falhas, ainda assim em alguns casos não é o suficiente. Muitas vezes, uma falha está relacionada a um produto ou processo específico e podem ser recorrentes ou gerados por uma única causa primordial, fazendo com que as empresas tenham que lidar com elas constantemente (AGUIAR, 2014).

A forma mais utilizada pelas empresas para tratar as falhas que ocorrem no setor de manutenção é traçando ações para que as causas sejam corrigidas e com isso continuar com a produção em escala. Contudo, corrigir um problema de forma pontual, ou seja, sem trabalhar em uma análise aprofundada para identificar todas as causas envolvidas, não elimina a recorrência do mesmo. Frente a tal perspectiva, a metodologia ACR (Análise de Causa Raiz) atua como uma ferramenta com embasamento analítico mais aprofundado, de forma que os problemas sejam melhor compreendidos e resolvidos, reduzindo a probabilidade de reincidência da falha, uma vez que, o método identifica não somente as causas contribuintes da falha, mas também sua causa raiz (TELLES, 2019).

Segundo Roney e Heuvel (2004), a metodologia de análise causa raiz foi desenvolvida, não só para definir quando e como um evento ocorreu, mas também para determinar o porquê de ele ter ocorrido. Somente quando for possível determinar a razão do evento será possível, então, determinar as medidas para correção e prevenção da ocorrência para que, futuramente, eventos com a mesma característica não voltem a ocorrer.

Diante disso, este trabalho apresenta a aplicação da metodologia ACR para análise da falha funcional prematura de uma embreagem de direção e freio de um trator de esteiras Caterpillar. O ativo em questão é utilizado em atividades de decapeamento de uma mineradora localizada no sudeste do estado do Pará. A devida aplicação e posterior acompanhamento do método de análise de causa raiz foi realizada durante o período de 10 meses sob direcionamento do autor, que participou ativamente de todas as etapas da análise, juntamente a uma equipe de profissionais de manutenção atuantes na frota de tratores da organização em questão.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Utilizar a metodologia ACR (Análise de Causa Raiz) para identificar as causas contribuintes e a causa primordial da falha prematura de uma embreagem de direção e freio de um trator de esteiras de forma a evitar a recorrência do modo de falha.

### 1.1.2 Objetivos específicos

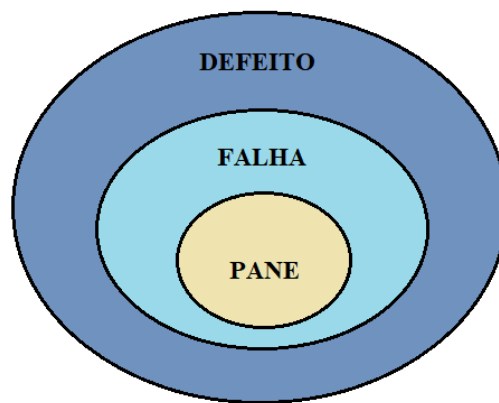
- Coletar dados da embreagem, informações da ocorrência da falha e identificar gatilho para a realização da análise.
- Utilizar ferramentas específicas de análise, como o método dos cinco porquês e o diagrama de Ishikawa, para identificar as causas da falha;
- Definir um plano de ações para tratar a causa raiz e as causas contribuintes de forma a evitar a recorrência de falhas com as mesmas características e promover melhorias no processo;
- Verificar a efetividade das ações após a devida aplicação ao modelo de manutenção.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FALHAS

A falha se caracteriza quando algum equipamento ou item passam a não executar suas devidas funções de forma plena. Segundo Pallerosi (2007) os conceitos de falha e pane estão diretamente relacionados e fazem parte de um conjunto maior chamado defeito. Enquanto a pane é caracterizado por um item estar impossibilitado de desempenhar uma função requerida o defeito representa qualquer desvio de característica em relação aos requisitos normalizados. A Figura 1 mostra os três conceitos relacionados de acordo com que estabelece Pallerosi (2007).

**Figura 1. Relação entre pane, falha e defeito.**



Fonte: Adaptado de Pallerosi (2007).

De acordo com Braidotti Junior (2013), as falhas podem ser divididas em falha funcional e falha potencial.

A falha funcional pode ser dita como a incapacidade de um equipamento em realizar as funções para qual o mesmo foi projetado e fabricado, não atendendo a um padrão de desempenho satisfatório (BRAIDOTTI JUNIOR, 2013).

Se não corrigida de forma imediata, uma falha funcional pode evoluir para um estágio de quebra total onde há completa perda de função por parte do ativo, o que acaba por gerar grandes prejuízos em um processo produtivo (BRAIDOTTI JUNIOR, 2013).

A falha potencial pode ser definida como uma condição física capaz de indicar a ocorrência de uma falha funcional ainda em seu estágio inicial. A sua devida identificação ocorre através da aplicação de inspeções preditivas (manutenção baseada na condição) através de técnicas como termografias e análise de vibrações (BRAIDOTTI JUNIOR, 2013).

Segundo Telles (2019), inicialmente uma falha potencial não atinge parâmetros tão elevados suficientes, tais como quebras catastróficas, que sejam capazes de interromper o funcionamento do equipamento, porém sua performance passa ser comprometida à medida que o tempo passa, sendo necessário, dessa forma, que ações corretivas sejam realizadas para evitar o desenvolvimento da falha.

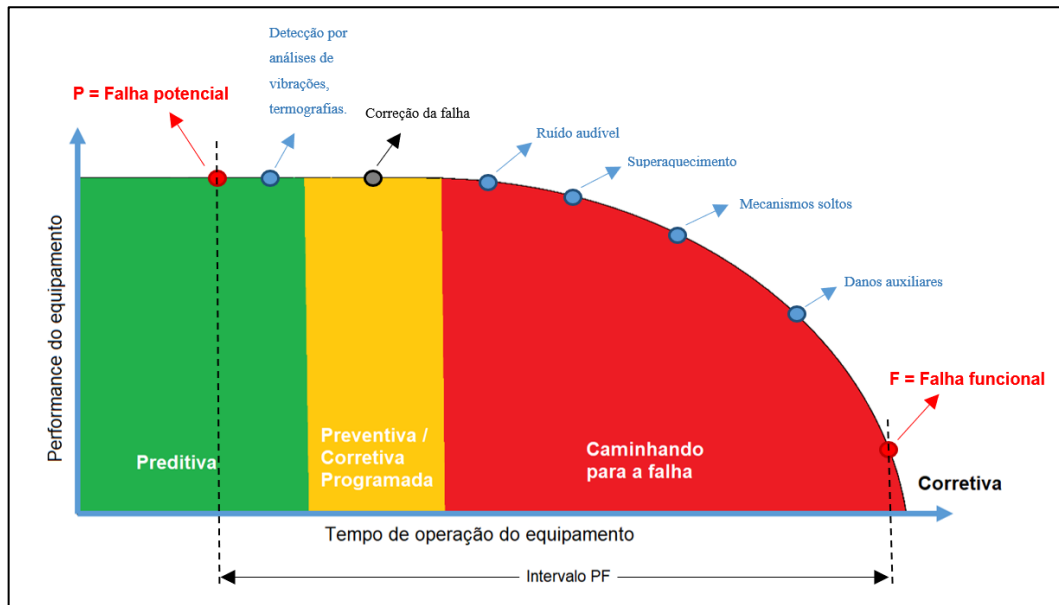
Telles (2019) demonstra de forma gráfica, o desenvolvimento de uma falha potencial até o ponto em que esta culmina em uma falha funcional. A curva potencial funcional ressalta as formas de como os sinais da evolução de uma falha podem ser identificados pelos diferentes tipos de manutenções, de forma que a perda de função por um equipamento possa ser evitada.

### **2.1.1 Curva Potencial Funcional (PF)**

A curva PF é uma ferramenta analítica desenvolvida por engenheiros da Federal Aviation Administration nos Estados Unidos no início da década de 70. Trata-se de um plano cartesiano simples em que uma curva descreve o desempenho de um equipamento ao longo do seu período de operação. Neste, o principal objetivo é mensurar o intervalo existente entre uma falha potencial e uma falha funcional (TELLES, 2019). Essa ferramenta é essencial para que um plano de manutenção seja baseado em confiabilidade e esteja seguindo os padrões RCM (Reliability Centered Maintenance).

Como é mostrado na Figura 2, é possível identificar o início de uma falha potencial através de manutenções preditivas. A falha potencial deve receber devida atenção com base na sua criticidade e ser corrigida nos próximos planos preventivos do ativo. A criticidade de uma falha potencial pode ser determinada com base em diversos fatores, dentre eles a velocidade de seu desenvolvimento, impacto em disponibilidade, impacto em custos, etc.

**Figura 2. Curva potencial funcional (PF) no plano cartesiano.**



Fonte: Adaptado de Telles (2019).

Quando uma máquina falha de maneira crítica, geralmente os responsáveis pela gestão de ativos precisam retirá-la, substituí-la ou tomar alguma iniciativa que evite sua recorrência. Nesses casos, é necessário realizar análise de causas e programar ações corretivas para a extinção da falha. Caso tais medidas não sejam tomadas, o desempenho do equipamento se comprometera com o tempo até que a falha funcional, de fato, ocorra (TELLES, 2019).

A região delimitada pela curva PF é dividida, por Telles (2019), em 3 regiões características. A primeira delas é ocupada pela manutenção preditiva e representada pela cor verde. Essa região é caracterizada pela utilização de técnicas de monitoramento de equipamentos afim de identificar uma falha potencial ainda em seu estágio inicial de degradação. Algumas das técnicas mais usadas na manutenção preditiva são as inspeções sensitivas, análises de vibrações, termografias, a ferrografia, dentre outras (TOAZZA e SELLITO, 2015).

Os benefícios da manutenção preditiva abrangem a redução dos prazos e custos de manutenção, além de fornecer uma previsão de falhas potenciais com antecedência e melhorar as condições de operação dos equipamentos, tornando-o mais confiável dentro de um processo produtivo. Trata-se de um modelo de manutenção que visa intervir o mínimo possível nas condições originais de um item a fim de conservar seu funcionamento (TOAZZA e SELLITO, 2015).

Em seguida, tem-se a região amarela, referente as manutenções preventivas e corretivas programadas. Uma vez que a falha potencial foi identificada através de técnicas de inspeção, esta deve ser corrigida através da programação de manutenções preventivas ou corretivas programadas de forma a eliminar a falha potencial e, conseqüentemente, evitar degradação do funcionamento do equipamento.

E por fim, a região vermelha ressalta um cenário em que a falha potencial é ignorada pela equipe de manutenção. Com isso, sinais de degradação do equipamento, como ruídos audíveis, superaquecimento, mecanismos folgados e danos auxiliares, começam a se manifestar até que a falha funcional ocorra. Dessa forma, com o funcionamento interrompido, o ativo deverá ser submetido a uma manutenção corretiva emergencial para sua devida recuperação.

A mérito de custos, sabe-se que as manutenções corretivas emergencial e programada, custam em média, respectivamente, 7 e 5 vezes mais que a manutenção realizada de forma proativa, ou seja, através de manutenções preventivas e preditivas (TELLES, 2019).

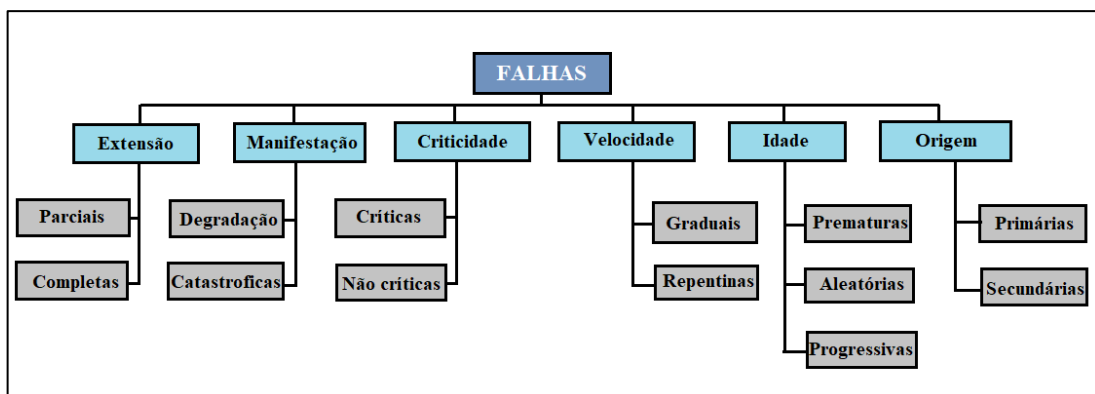
### 2.1.2 Classificação de falhas

Os componentes de equipamentos são projetados com base no estabelecimento de um período de vida útil em operação, sendo que, após a extrapolação desse período, o sistema estará sujeito à falha em qualquer momento (AFONSO, 2006).

Dessa forma, é extremamente necessário conhecer quanto aos tipos de falhas para poder definir medidas e ações preventivas para atuar no controle da falha desde a fase de projeto.

De acordo com Siqueira (2009) as falhas podem ser classificadas com base na extensão, manifestação, criticidade, velocidade, idade e origem. O esquema disposto na Figura 3 mostra a classificação conforme o autor.

Figura 3. Classificação de falhas.



Fonte: Adaptado de Siqueira (2009).

- **Quanto a extensão:** Uma falha por extensão se caracteriza pelo grau de interferência na função realizada por um determinado equipamento. São parciais, quando geram alteração de algum parâmetro de operação do equipamento, porém sem perda total de função; ou completas, quando geram perda total da função a ser realizada.
- **Quanto a manifestação:** Esse tipo de falha é determinado pela forma de como esta é capaz de interromper o funcionamento de um equipamento. Ocorrem por degradação, quando a falha se desenvolve de forma gradual ou parcial, podendo evoluir para completa com o decorrer do tempo; ou de forma catastrófica, quando a falha ocorre de forma repentina e completa.
- **Quanto a criticidade:** Falhas críticas são definidas como eventos que geram perdas intangíveis, como perdas de produção, de equipamento, de dinheiro oferecem risco a segurança humana. Já as falhas não críticas não geram riscos graves a uma empresa e nem perdas intangíveis.
- **Quanto a velocidade:** Esse tipo de falha é definido pelo intervalo de tempo até que a mesma seja capaz de gerar a perda de função por um equipamento operante. Podem ser graduais, geralmente ocorrem devido ao desgaste da utilização e podem ser previstas com o auxílio de técnicas da manutenção preditiva antes de se manifestarem; ou repentinas, quando não são previstas e ocorrem de forma inesperada.
- **Quanto a idade:** Esta falha é caracterizada pelo momento de sua ocorrência em relação ao estado do equipamento e sua vida útil. São prematuras, quando ocorrem no início da vida do equipamento; aleatórias, quando ocorrem de forma imprevisível; ou progressivas, quando evoluem a partir de desgastes, deterioração e envelhecimento do equipamento.
- **Quanto a origem:** Falhas quanto a origem são definidas com base em limites operacionais de um equipamento, limites esses, estabelecidos pelo fabricante. São ditas como primárias, falhas que ocorrem por deficiência de um componente em

decorrência de desgaste ou erro de projeto dentro dos limites operacionais estabelecidos; e são ditas como secundárias, falhas que ocorrem quando os limites operacionais são excedidos.

## 2.2 ANÁLISE DE CAUSA RAÍZ (ACR)

O método da Análise da Causa Raiz é uma ferramenta utilizada, não apenas para definir quando e como um evento ocorreu, mas também para determinar o porquê de ele ter ocorrido. Somente quando for possível determinar a razão do evento será possível, então, determinar as medidas para correção e prevenção da ocorrência para que, futuramente, eventos com a mesma característica não voltem a acontecer (ROONEY E HEUVEL, 2004). Ou seja, a análise de causa raiz consiste na investigação do problema e identificação da(s) sua(s) causa(s) para posterior tomada de ações corretivas.

A metodologia ACR originalmente chamada de RCA (*Root Cause Analysis*) é uma das ferramentas presentes na ISO/IEC 31010, uma norma de gestão de risco criada em 2009 pela ISO (*International Organization for Standardization*) em parceria com a IEC (*International Electrotechnical Commission*). Em 2012 a norma foi traduzida e nomeada pela ABNT como "NBR ISO 31010: Gestão de riscos: Técnicas para o processo de avaliação de riscos".

A análise de uma grande perda de forma a evitar sua recorrência é comumente associada a análise de causa raiz. Este tipo de avaliação busca identificar a raiz ou as causas originais ao invés de lidar somente com os sintomas mais óbvios relacionados ao evento de falha (ABNT, 2012).

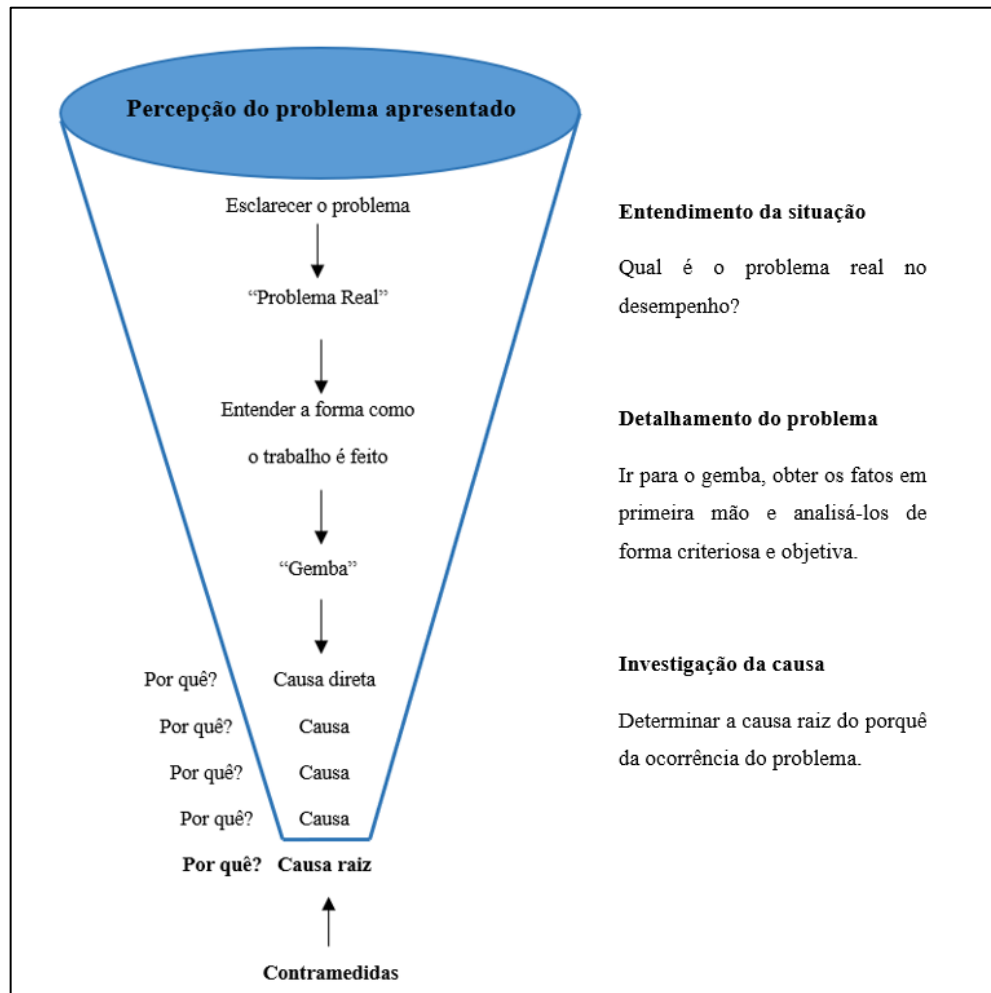
Esse tipo de investigação está diretamente atrelado ao conceito de problema. Dessa forma, Shook (2008) define problema como um desempenho diferente do desejado em um dado momento com base em parâmetros de qualidade definidos. Assim, o problema representa uma barreira que gera desvios que afetam o alcance das metas de uma empresa (SHOOK, 2008).

Na perspectiva de Aguiar (2014), um problema se caracteriza quando o padrão de desempenho de um processo ou equipamento é modificado por um evento pontual, gerando um desvio entre o desempenho projetado e o observado em tempo real.

É reconhecido que nem sempre uma ação corretiva é totalmente efetiva na solução de um problema, dessa forma, atividades de melhoria contínua devem ser aplicadas ao processo como forma de garantir a efetividade no tratamento de recorrência de falhas.

Shook (2008) propõe uma representação que detalha um problema mostrando sua relação direta com sua causa raiz, a mesma pode ser observada na Figura 4.

**Figura 4. Relação esquemática entre problema e causa raiz.**



Fonte: Adaptado de Shook (2008).

Na Figura 4, tem-se um funil no qual o topo é ocupado pela percepção inicial de um problema. Nesta, inúmeras hipóteses são levantadas através do senso comum para como o problema pode ter ocorrido.

Em seguida tem-se a etapa de esclarecer o problema através do entendimento da situação. Nesta etapa as principais informações adquiridas na percepção inicial do problema serão filtradas e informações irrelevantes em torno do mesmo serão descartadas. Como resultado disso temos o “problema real” com base somente em dados relevantes para o processo de análise.

Em seguida tem se a fase de entender como o trabalho é realizado, que por sua vez resultará na “gemba” (lugar onde ocorre o trabalho com valor agregado), que consiste no ato de

ir ao verdadeiro local onde o problema ocorreu e investigar como as condições ali observados podem ter ligação com a falha ocorrida.

Entendendo o processo e/ou o funcionamento de um equipamento junto a posse de informações em torno do que pode ter gerado o problema, pode-se então dar início às investigações com base na utilização de diversos métodos de análise de causa raiz, no caso da ilustração, o autor optou por utilizar o método dos cinco porquês até concluir o processo de investigação e apontar a causa primordial do problema para que, então, as devidas contramedidas possam ser tomadas para evitar a recorrência do evento.

### 2.2.1 Tipos de causas

Ammerman (1998) descreve, em seu manual de análise de causa raiz (Handbook), os 3 principais tipos de causas, ressaltando a diferença entre causa raiz e os outros tipos de causa:

- **Causas presumíveis:** são as causas improváveis que surgem durante a coleta de dados e precisam de confirmação para que sejam consideradas no processo de análise.
- **Causas contribuintes:** são causas, que individualmente, não seriam capazes de gerar o problema, porém devem ser consideradas para a tomada de ações de corretivas para a melhoria da qualidade do processo ou equipamento. Nesta categoria estão inclusas as causas secundárias e as possíveis causas do problema.
- **Causa raiz:** é a causa, que se corrigida, prevenirá a recorrência do problema. É dada como a causa primordial e a razão para a ocorrência do problema.

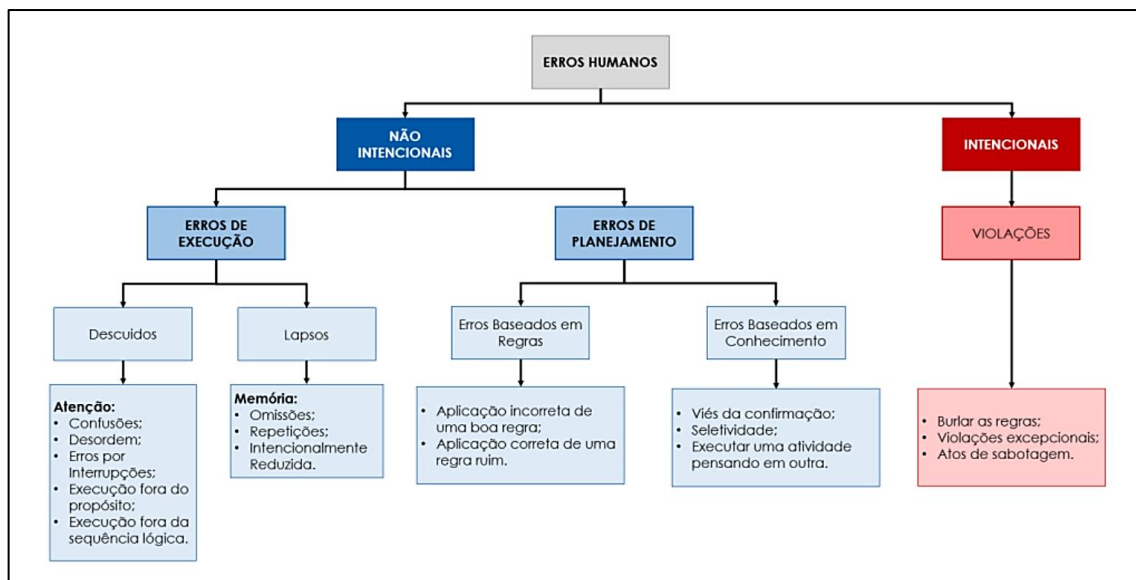
Ao longo da análise é normal acreditar que já se alcançou a causa raiz do problema, sem se ter realmente alcançado. Sabe-se que a causa raiz é aquela que se não existisse o problema não se desenvolveria, logo é importante avaliar se, após a eliminação de uma suposta causa raiz, o problema foi eliminado definitivamente. Caso o mesmo não tenha mais apresentado recorrência, as chances dessa causa ser a causa raiz são grandes. Caso contrário, há possibilidades de essa não ser a causa raiz do problema (AGUIAR, 2014).

Telles (2019) afirma que uma causa é gerada a partir da soma diversos fatores de influência, frente a tal perspectiva, tem-se o conceito de outros 3 tipos de causas:

- **Causa física:** evento ou condição física responsável por gerar uma falha potencial ou funcional. Esse fenômeno físico provoca a mudança de estado de um componente normal para anormal, interferindo a execução da função requerida.
- **Causa Organizacional:** deficiência de execução nas estratégias que conduzem um modelo de gestão a resultados positivos, uma vez que cabe à gestão organizacional definir processos e promover o controle e a devida alocação de recursos, sejam eles financeiros, materiais, técnicos ou humanos.
- **Causa humana:** fator determinado devido a um desvio na confiabilidade humana, dada como a probabilidade de uma atividade ser executada de acordo com os objetivos sem a ocorrência de erros. Ou seja, esta causa é definida a partir de erros humanos, seja por planejamento inadequado ou execuções realizadas em desconformidade.

Telles (2019) ainda classifica os erros humanos em intencionais e não intencionais, através de uma árvore de ramificações resultantes em um apontamento mais específico do tipo de erro gerado. O esquema pode ser observado na Figura 5.

Figura 5. Tipos de erros humanos.



Fonte: Telles (2019).

## 2.2.2 Ferramentas de Análise

De acordo com a ABNT (2012) através da norma NBR ISO 31010, as técnicas de análise estruturada dentro do método ACR podem consistir na utilização em uma ou mais das seguintes ferramentas:

- Método dos cinco porquês;
- Análise do modo e efeito de falhas;
- Análise de árvore de falhas;
- Diagrama de Ishikawa;
- Análise de pareto;
- Mapeamento de causa raiz.

Para auxílio na determinação de causa raiz, foram escolhidas duas ferramentas de análise da ACR, sendo estas, o método dos cinco porquês e o diagrama de Ishikawa.

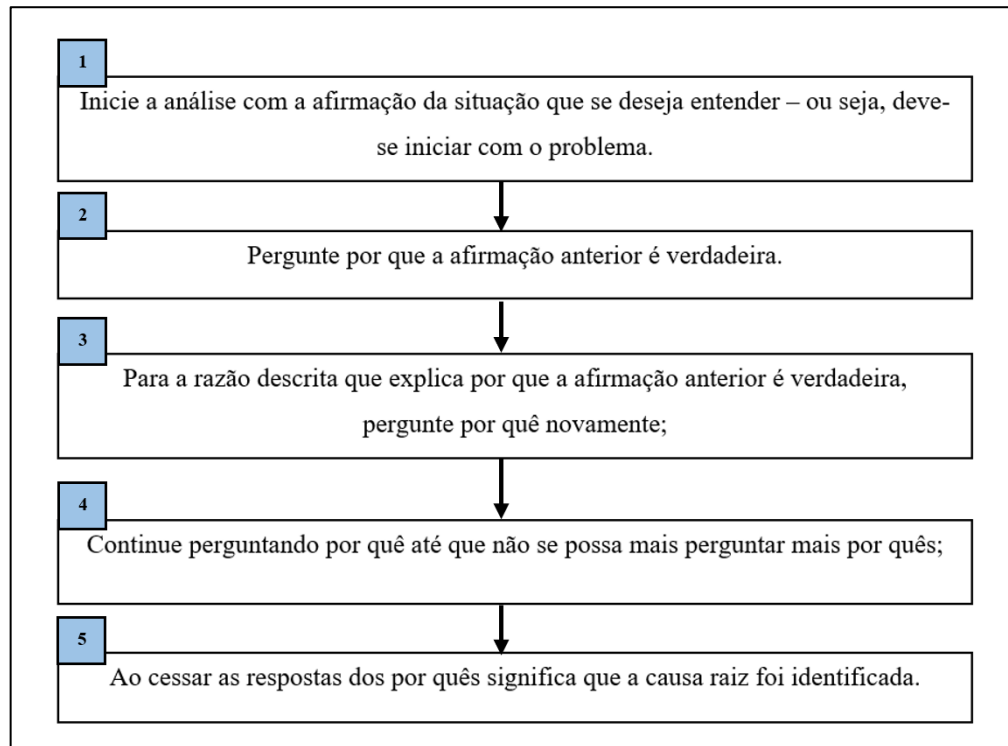
### 2.2.2.1 *Método dos cinco porquês*

O método dos 5 porquês é uma abordagem de cunho científico introduzida pelo sistema Toyota de produção a partir da década de 1950 (TELLES, 2019). A ferramenta consiste em se perguntar o porquê de um problema várias vezes de forma sucessiva para se chegar a uma causa raiz.

Para Ternner (2008) o método dos 5 porquês é incidente em análise de falhas pelo fato de impor inúmeros questionamentos capazes de direcionar uma análise separando a causa do efeito e fomentando, então, hipóteses plausíveis para a causa raiz do problema.

Apesar de estar atrelado ao número cinco, Weiss (2011) ressalta que podem ser utilizados menos ou mais porquês (três ou oito por exemplo) para a análise dependendo da necessidade para que se identifique a causa raiz. O autor ainda descreve, de forma sucinta, os passos em sequência para se aplicar o método de forma correta. Os mesmos podem ser observados na Figura 6.

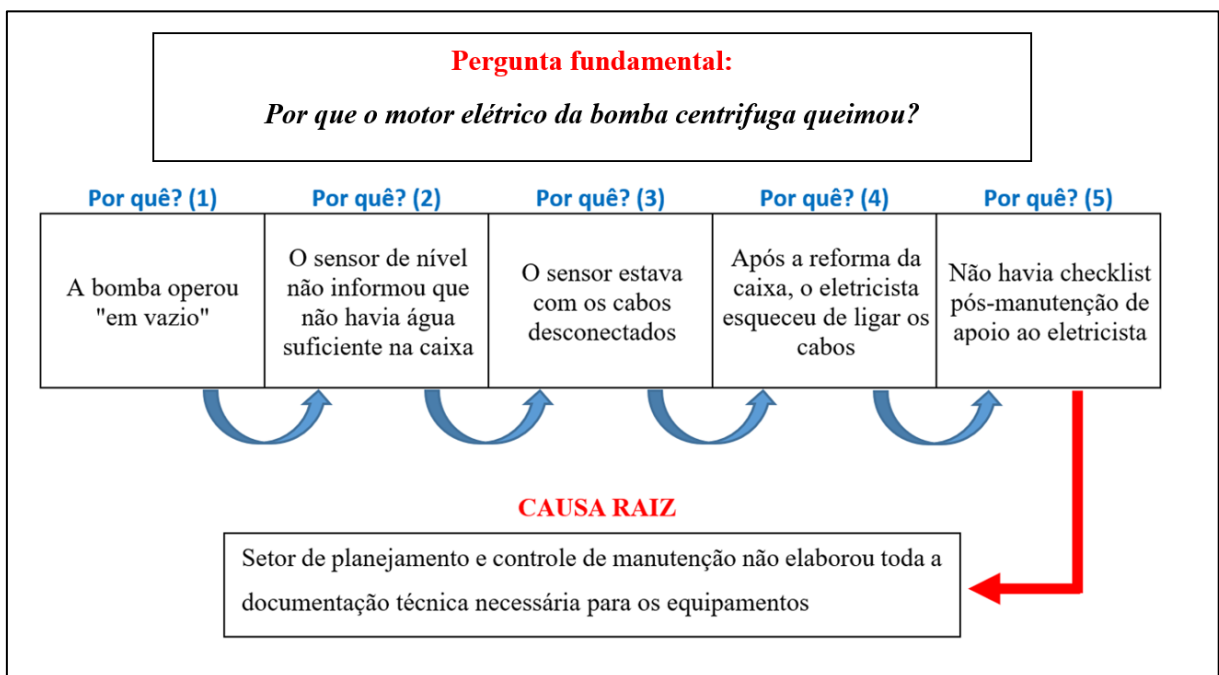
**Figura 6. Passos para a aplicação do método dos cinco porquês.**



Fonte: Adaptado de Weiss (2011).

Na Figura 7 tem-se um exemplo proposto por Telles (2019) no qual há a aplicação do método dos 5 porquês a um evento da queima de um motor elétrico de uma bomba centrífuga.

**Figura 7. Exemplo da aplicação do método dos cinco porquês.**



Fonte: Adaptado de Telles (2019).

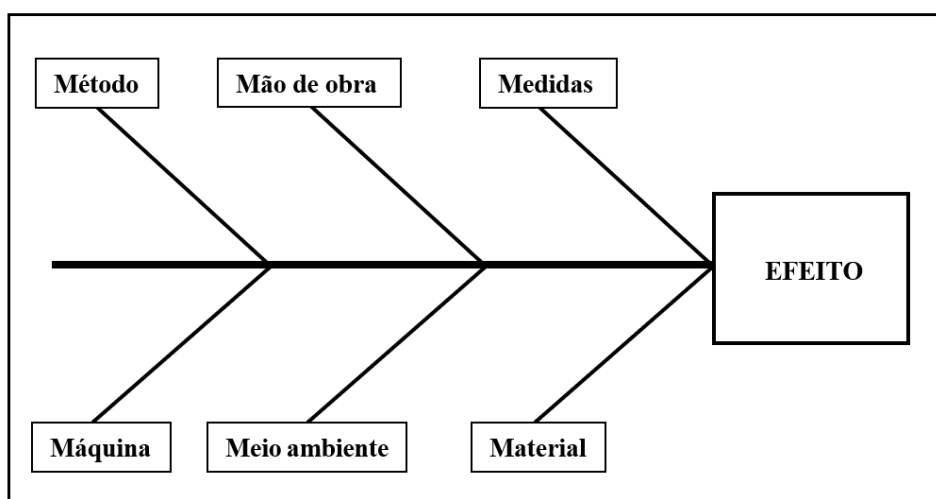
Telles (2019) ainda ressalta que o método dos cinco porquês é mais bem aplicável a causas físicas como desgastes de superfícies e a própria queima de um motor conforme mostrado na Figura 9, uma vez que estas estão associadas a parâmetros de construção, manutenção e operação dos componentes que acaba facilitando a análise de falha. Além disso o autor também sugere a utilização de outros métodos, tais como, o diagrama de Ishikawa, para o complemento dos cinco porquês em situações em que haja mais de uma resposta para alguns dos porquês, o que torna a análise mais complexa.

### 2.2.2.2 Diagrama de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa, também chamado de diagrama de causa e efeito ou diagrama espinha de peixe (devido ao formato parecido com uma espinha de peixe) foi criado no Japão no ano de 1943, pelo japonês Kaoru Ishiwaka, engenheiro de controle de qualidade, técnico da administração das companhias japonesas e professor na universidade de Tóquio (PALADINI, 2012).

A construção do diagrama se baseia em uma linha central com ramificações, nas quais cada uma indica uma de seis categoria de análise onde causas potenciais são listadas e testadas para validação a partir de evidências ou outras ferramentas de identificação (TELLES, 2019). A Figura 10 mostra a estrutura simplificada de um diagrama de Ishikawa:

**Figura 8. Estrutura simplificada de um diagrama de Ishikawa.**



Fonte: Adaptado de Telles (2019).

Dessa forma temos 6 categorias para análise de falhas (6M's). A categoria método refere-se aos procedimentos e métodos adotados pela organização durante a realização de

atividades de manutenção, o que pode incluir softwares e ferramentas de planejamento. Nessa categoria deve se questionar como a forma de desenvolver o trabalho influencia o problema (COUTINHO, 2020).

A categoria mão de obra está relacionada com atuação de pessoas na execução das atividades, uma vez que muitos problemas podem ser gerados devido a pressa na execução das tarefas, falta de atenção e qualificação ou até ausência de competência. Dessa forma deve-se questionar, nesta categoria, como as pessoas envolvidas na atividade influenciam o problema (COUTINHO, 2020).

Em medidas avalia-se as métricas utilizadas para medir, controlar e monitorar o processo de desenvolvimento de uma atividade, uma vez que se esse controle for realizado de forma incorreta, pode gerar índices de retrabalho, o que pode ser uma causa associada a medida (COUTINHO, 2020).

A categoria máquina está associada a forma de como os equipamentos utilizados no processo. As causas listadas nessa categoria estão diretamente associadas a falha de equipamentos, geralmente ocasionadas devido à falta de manutenção ou utilização inadequada (COUTINHO, 2020).

A categoria meio ambiente está associada a problemas que estão relacionados aos ambientes internos e externos da organização, dessa forma, deve-se questionar como o meio em que a atividade está sendo desenvolvida influencia o problema. Quando se fala em ambiente externo, a instabilidade do tempo junto a fatores climáticos como chuva, sol e umidade podem ser grandes causadores de problemas. A nível de ambiente interno, pode-se apontar a falta de espaço, layout incorreto, etc (COUTINHO, 2020).

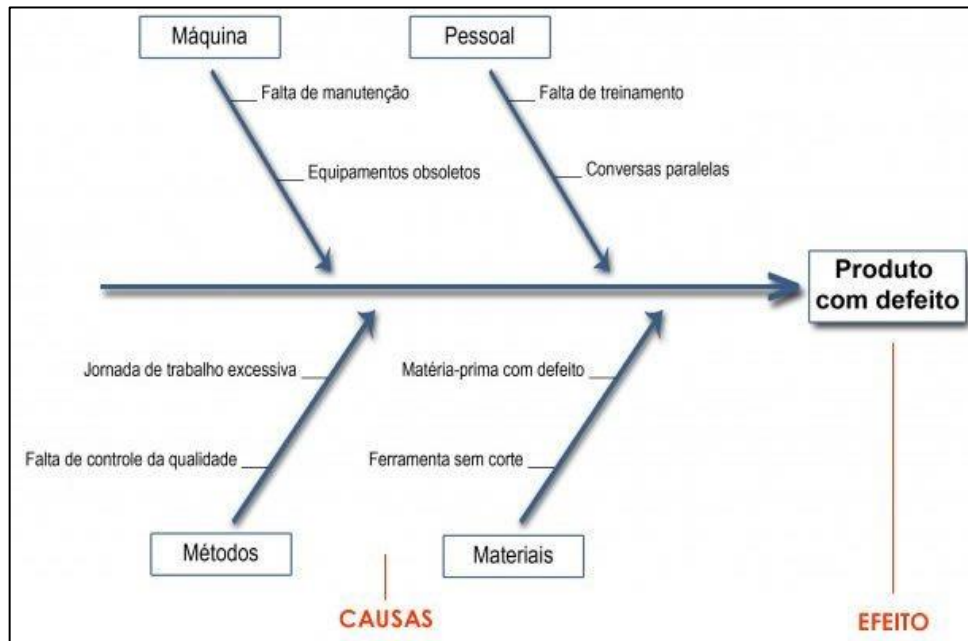
Na categoria materiais deve-se questionar como a qualidade e o tipo dos materiais utilizados influenciam o problema, de forma a analisar quanto a utilização de materiais fora de especificação ou em quantidades inadequadas (TELLES, 2019).

Todas as causas listadas nas categorias apresentadas são responsáveis por gerar um efeito, sendo este caracterizada por uma determinada falha de processo ou equipamento, frente a isso, o diagrama procura estabelecer a relatividade existente entre esse efeito e todas as causas envolvidas no processo. Logo pode-se dizer que todo o efeito possui diferentes categorias de causas (RODRIGUES, 2010). Telles (2019) ressalta que embora o método seja caracterizado

por 6 categorias, nem sempre todas elas serão utilizadas, uma vez que são variantes ligadas a individualidade de cada evento.

Andrade (2017) mostra a aplicação do método para identificar as causas que levaram a fabricação de um produto com defeito, o esquema proposto pode ser visto na Figura 9.

**Figura 9. Exemplificação da aplicação do diagrama de Ishikawa.**



Fonte: Andrade (2017).

Para a falha associada a fabricação de produto com defeito mostrada na Figura 11 foram identificadas pelo método de Ishikawa as seguintes causas: na categoria máquina, falta de manutenção e equipamentos obsoletos; na categoria pessoal (ou mão de obra), falta de treinamento e conversas paralelas; na categoria método, jornada de trabalho excessivas e falta de controle de qualidade; e na categoria materiais, matéria prima com defeito e ferramentas sem corte.

Portanto, o diagrama, tem como objetivo ajudar a equipe a chegar nas causas reais de problemas que interferem nos processos organizacionais de uma empresa. Em outras palavras, seu propósito é descobrir os fatores que resultam em uma situação indesejada na organização (TELLES, 2019).

Para Telles (2019), após a devida categorização das possíveis causas será possível enxergar de forma clara o que de fato seria a causa raiz do problema. Além disso, é importante ressaltar que o diagrama de Ishikawa, parte do princípio que a causa provável é toda a fonte

geradora de um determinado efeito, e que o problema é o efeito que constitui um fato que pode ser mensurado.

### **2.2.3 Etapas da ACR**

Há inúmeras maneiras para seguir a investigação das causas, seguindo uma sequência lógica particular a cada metodologia de análise de causa raiz. Neste trabalho serão abordados dois métodos semelhantes, o primeiro proposto por Rooney e Heuvel (2004), na qual a ACR é dividida em quatro etapas, sendo elas:

1. Coleta de dados;
2. Diagramas de falha;
3. Identificação de causa raiz;
4. Geração de recomendações.

Em uma análise de causa raiz é necessário compreender o evento ocorrido através da coleta de informações operacionais, de manutenção e de projeto, sendo esta a primeira etapa para a identificação das causas. Para melhor entendimento do evento, sua sequência lógica, fatores determinantes, sejam estes humanos, operacionais, de projeto, é feito um diagrama lógico para organizar todas as informações (ROONEY e HEUVEL, 2004).

Após a coleta e organização de todas as informações, pode-se então proceder com análises, utilizando as ferramentas disponíveis, e identificar as causas que influenciaram a ocorrência do evento. E por fim, após a identificação da causa raízes e causas contribuintes, deve-se propor um plano de ação composto por soluções para evitar a recorrência do evento de falha (ROONEY e HEUVEL, 2004).

O segundo método, é proposto por Telles (2019) e trata-se de um aperfeiçoamento do método de Rooney e Heuvel (2004) com etapas adicionais ao procedimento de análise de causa raiz, o que lhe fornece maior detalhamento. As etapas são:

1. Definição de gatilhos;
2. Definição de comitê de análise;
3. Análise preliminar;
4. Elaboração da análise.
  - a. Informações iniciais;
  - b. Descrição do problema;

- c. Definir causa raiz;
- d. Plano de ação.

A princípio deve-se definir os gatilhos de processo, sendo estes eventos pré-determinados, nos quais sua ocorrência irá indicar que deverá ser feito uma análise da falha e identificar sua causa raiz. Esses gatilhos devem ser definidos com base em fatores que podem comprometer os reais ganhos de uma organização. Telles (2019) sugere como gatilhos para realização da ACR:

- **Segurança, saúde e meio ambiente (HSE):** refere-se à quando um evento gera danos à saúde e segurança humana e agressões ao meio ambiente, como eventos de princípio de incêndio.
- **Impacto em disponibilidade:** Quando um evento em corretiva gera grandes tempos de parada, afetando a disponibilidade e o índice MTTR (Tempo Médio Para Reparo) da máquina.
- **Impacto em custo:** Quando a parada gera prejuízos financeiros para a organização, uma vez que há um custo horário de manutenção para se manter os equipamentos, além de horas em estado parado se resumir em improdutividade.
- **Recorrência de falha:** Quando um evento de falha se repetir por 3 ou mais vezes em um período de 30 dias, o que afeta o índice MTBF (Tempo Médio Entre Falhas).
- **Falha prematura:** Quando o componente falho responsável pelo evento corretivo está abaixo dos 80% de sua vida útil indicada pelo fabricante.

Em seguida, deve-se reunir um time de pessoas qualificadas para a realização do procedimento de análise. Denominada comitê de análise, essa equipe deve ser formada por: quem encontrou a falha, quem corrigiu, especialistas da área, facilitadores, operadores e etc (TELLES, 2019).

Na etapa de análise preliminar, o facilitador deve reunir todas os registros necessários para o início da análise em si, como ordens de serviço, fotografias e vídeos existentes, relatórios e etc. A partir de então, o comitê deve recorrer a “gemba” (ir a campo) e entender como o evento de falha ocorreu e definir uma ordem cronológica (TELLES, 2019).

Para a elaboração da análise, deve-se inicialmente reunir informações como gatilho de falha, data e hora de início e fim da falha, tempo de parada do equipamento assim como data e hora de sua liberação, representantes do comitê de análise, impacto financeiro e etc. Em seguida parte-se para a descrição, de forma dissertativa e detalhada, do evento que gerou a falha. No relato deve estar descrito o que gerou a falha, quando a falha ocorreu, como ela ocorreu, onde ocorreu e/ou quem cometeu (TELLES, 2019).

Em seguida, ainda como parte da elaboração da análise, deve usar as ferramentas de análise de falhas, como o método dos 5 porquês e o diagrama de Ishikawa para direcionar as demais causas a uma causa primordial, definindo então, a raiz da falha. E por fim com a causa raiz definida, deve-se traçar as ações em um plano para conter a recorrência das falhas (TELLES, 2019).

Com as causas contribuintes e causa raiz devidamente identificadas, para a realização da etapa de elaboração do plano de ação Telles (2019) sugere a utilização da ferramenta 5W1H ou 5W2H.

O termo da ferramenta deriva de vários termos em inglês que embasam os questionamentos a serem feitos para atingir os objetivos desejados para cada ação presente no plano de recomendações. Os termos referentes as siglas são:

- **What:** Definido como “O que será feito?”;
- **Why:** Definido como “Por que será feito?”;
- **Where:** Definido como “Onde será feito?”;
- **When:** Definido como “Quando será feito?”;
- **Who:** Definido como “Por quem será feito?”;
- **How:** Definido como “Como será feito?”;
- **How much:** Definido como “Quanto custará?”.

A diferença entre as ferramentas 5W1H e 5W2H está na necessidade ou não de abordar os custos associados a uma ação, sendo o H a mais, na segunda sigla citada, referente ao termo “how much?”, em português descrito como “quanto custa?”. Telles (2019) demonstra a utilização do método conforme o exemplo mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1. Exemplificação da estrutura da ferramenta 5W2H.**

Ação	What? (O que será feito?)	When? (Quando será feito?)	Where? (Onde será feito?)	Why? (Por que será feito?)	Who? (Quem fará?)	How? (Como fará?)	How Much? (Quanto custará?)
1	Mudança de local do PCM para a oficina central.	15/05/2018	PCM	Para melhorar a comunicação e integração entre áreas.	Coordenador do PCM	Através da desocupação da sala de arquivo morto da oficina e instalação da infraestrutura para PCM.	R\$30.000,00
2	Definir uma política para controle de prazos para realização de atividades.	10/05/2018	Engenharia	Para evitar o acúmulo de atividades de manutenção em manutenção.	Gerente de Engenharia	Através de boas práticas como a priorização de serviços por criticidade.	-

Fonte: Adaptado de Telles (2019).

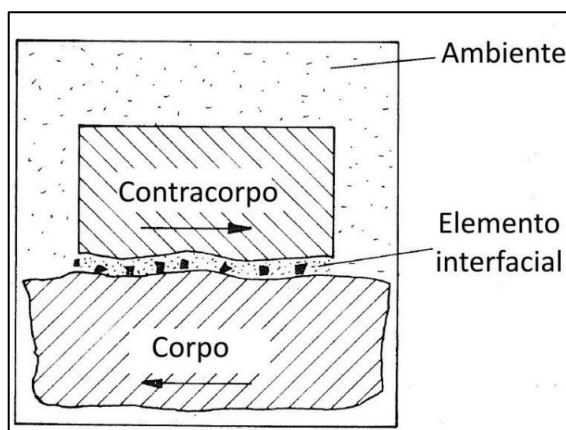
As ações definidas na Tabela 1 foram resultados de uma análise que apontou como causa raiz associada ao atraso excessivo na programação de atividades realizadas em uma oficina mecânica, a dificuldade de comunicação entre a equipe planejamento com os operários da oficina, uma vez que o departamento PCM e oficina de manutenção ficavam em instalações afastadas. Além disso, a falta de gerenciamento das atividades por parte da equipe de engenharia atuou como causa contribuinte para o atraso.

### 2.3 DESGASTES DE SUPERFÍCIES

A ciência que estuda os desgastes de materiais é chamada tribologia, a palavra deriva de termos gregos, ‘tribos’ que significa esfregar, e ‘logia’ que vem de estudo. Para Villábon e Sinatora (2006) a tribologia é uma ciência que estuda a interação entre superfícies com movimento relativo e junto a isso, o atrito, o desgaste, a lubrificação e etc.

Segundo a norma DIN 50320 (1979), um sistema tribológico consiste de todos aqueles elementos que podem afetar o comportamento tribológico. Este sistema é composto pelo corpo sólido, o contra corpo, o elemento interfacial e o meio. O contra corpo pode ser sólido, um líquido, um gás ou uma mistura. Os elementos interfaciais são lubrificantes e partículas presentes na região de contato, em certos casos, o elemento interfacial pode não estar presente. O meio, por sua vez, é caracterizado pelas condições de atuação de um equipamento. Os 4 elementos podem ser visualizados na Figura 10.

**Figura 10. Sistema tribológico.**



Fonte: Adaptado de Norma DIN 50320 (1979).

Carvalho (2014) ressalta que a resistência ao desgaste e a força de atrito não dependem apenas dos materiais envolvidos e suas devidas propriedades, mas também de condições de trabalho, ambiente, presença de óxidos, lubrificantes e o tipo de desgaste envolvido. Dessa forma, é necessário especificar um sistema modo a delimitar o campo de validade das propriedades tribológicas.

Para Stoeterau e Leal (2004) uma situação tribológica em que ocorre o contato entre duas ou mais superfícies resulta em duas manifestações exteriores:

- **Dissipação energética:** ocorre a dissipação de energia referente ao movimento, representada pelo coeficiente de atrito das superfícies resultando em liberação de calor e ruído.
- **Modificação de superfície:** durante o contato, superfícies são deformadas em diferentes níveis e intensidades que podem alterar a rugosidade superficial e outras propriedades físicas como a dureza. Essa mudança superficial pode ocasionar a perda progressiva do material em função da repetição do movimento de contato.

Dentro da tribologia, o desgaste é o principal objeto de estudo e de forma geral este pode ser definido como uma transformação cumulativa e não desejada em dimensões em decorrência da remoção gradual de partículas e superfícies em contato com movimento relativo em decorrência de ações mecânicas. (STOETERAU & LEAL, 2004).

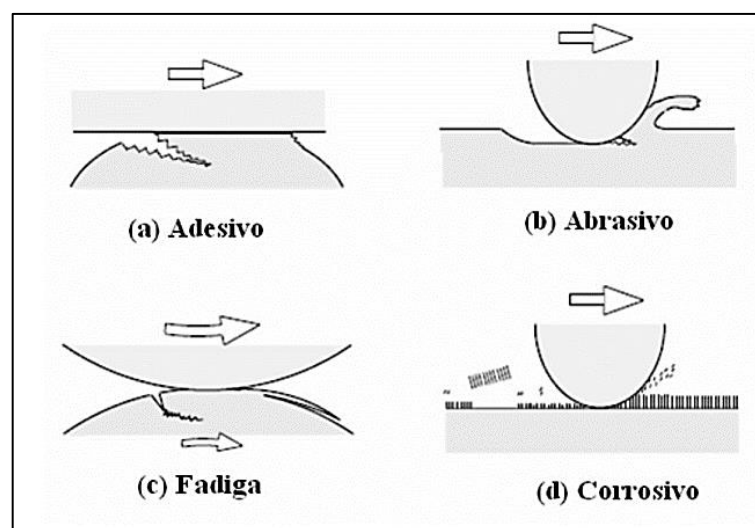
Em uma análise de falha com ocorrência de desgaste, é necessário entender o equipamento em questão. Tal entendimento requer o conhecimento de suas características básicas e também a sua manutenção, aplicação e operação. Além disso, é necessário obter

informações quanto a natureza de materiais envolvidos no evento, quanto a temperaturas e pressões de trabalho, quanto a lubrificação como tipo, qualidade e quantidade presente no sistema, quanto aos esforços aos quais os corpos envolvidos no evento estavam sujeitos no momento e principalmente, quanto ao tipo de desgaste sofrido.

### 2.3.1 Tipos de desgaste

Conforme mostra a Figura 11, Radi et al. (2007) classifica em 4 os principais tipos de desgaste: adesivo, abrasivo, fadiga e corrosivo. O desgaste abrasivo é ocasionado por partículas e protuberâncias localizadas nas superfícies dos materiais, que são atritadas umas contra as outras ao longo da superfície de contato. A perda de material se dá devido ao contato das partículas com os materiais atritados, que desgastam as superfícies destes. O desgaste adesivo acontece quando uma superfície desliza sobre outra e está relacionado com o contato e interação entre as asperezas das duas superfícies em deslizamento relativo, que produzem a transferência de material entre estas em decorrência da pressão de contato gerada. O desgaste devido a fadiga pode ser caracterizado pela formação de trincas e posterior rompimento do material, provocado pelo carregamento cíclico e repetitivo de superfícies sólidas. Esses carregamentos podem ser resultantes de rolamento ou impacto de sólidos e/ou líquidos na superfície. O desgaste corrosivo, por sua vez, ocorre quando a superfície do material reage com o meio a qual estar exposto, podendo ser o oxigênio do ar, gás, lubrificante ou até mesmo outro material sólido

**Figura 11. Principais tipos de desgastes em superfícies.**



Fonte: RADI et al. (2007).

Neste trabalho, serão abordados os desgastes adesivos e corrosivos, uma vez que são os principais modos de falha acometido no objeto de estudo deste trabalho que é a embreagem de

um trator de esteira. A seguir será descrito em maiores detalhes esses dois tipos de desgaste de superfície.

### *2.3.1.1 Desgaste adesivo*

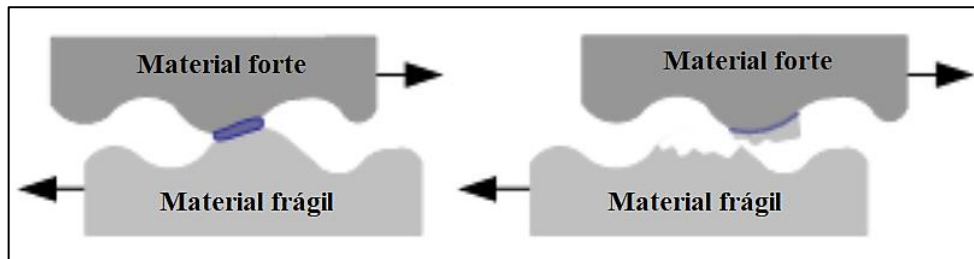
O desgaste adesivo ocorre quando uma ligação de adesão é gerada e é resistente o suficiente para resistir ao fenômeno de deslizamento de superfícies de contato. Em decorrência dessa adesão, é gerada uma deformação plástica na região de contato da superfície mais frágil que ocasiona a geração de uma trinca que ao se propagar gera a formação de um terceiro corpo e a transferência completa de material (RADI et al., 2007).

Sabe-se que toda superfície apresenta rugosidade que é caracterizada por picos e vales. Quando duas superfícies entram em contato, apenas parte das asperezas dessas superfícies realmente se tocam, sendo esta parcela denominada como área real de contato. Dessa forma, mesmo se a carga aplicada for relativamente baixa, a pressão localizada nos pontos de contato é alta o suficiente para gerar elevadas tensões que ultrapassam o valor da tensão de escoamento do material, gerando então, uma deformação plástica localizada (STOETERAU & LEAL, 2004).

Assim, dependendo da intensidade do atrito gerado nesses pontos que sofreram deformação plástica pode ocorrer o surgimento de forças adesivas mais fortes entre os átomos das superfícies, ocasionando o surgimento junções ou pontos de solda localizados. Além disso, vale ressaltar que o desgaste adesivo é o tipo de desgaste que apresenta a progressão mais rápida e também está associado ao contato sem lubrificação e/ou arrefecimento adequado (STOETERAU & LEAL, 2004).

Dessa forma, a partir do movimento relativo entre as superfícies, esses pontos de solda localizadas serão rompidos na interface do material mais frágil, ocorrendo então, a transferência de uma partícula de uma superfície para a outra, caracterizando assim o processo de desgaste adesivo conforme ilustra a Figura 12 (STOETERAU & LEAL, 2004).

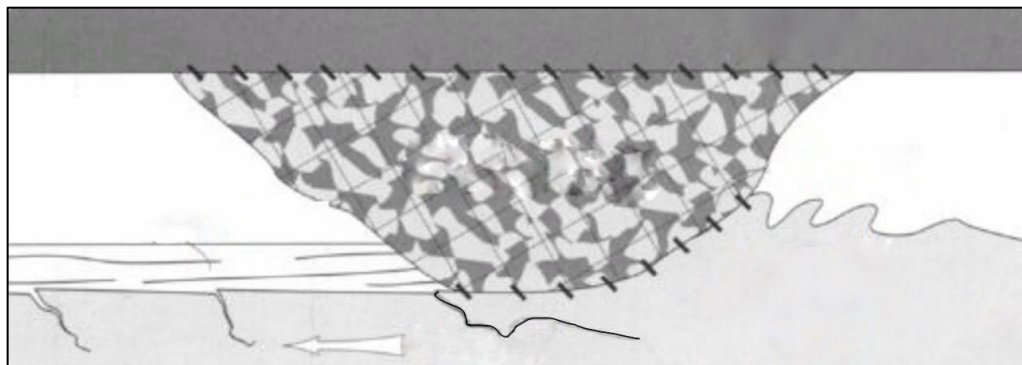
**Figura 12. Transferência de partículas no desgaste adesivo.**



Fonte: Adaptado de KOPELIOVICH (2020).

As partículas transferidas da superfície mais frágil para a mais forte ficam aderidas e acabam se somando a outras partículas que podem ser do mesmo material, do contra corpo ou partículas do meio interfacial. À medida que o contato vai se estendendo ao longo do tempo, essa partícula acaba provocando a formação de ranhuras devido ao sulcamento da superfície do material, fenômeno caracterizado por pressão de arrasto com atuação na direção e sentido do deslocamento da partícula aderida. Esse sulcamento pode levar a formação de trincas devido à altas tensões de tração que são desenvolvidas devido ao contato (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005). A Figura 13 mostra o mecanismo de formação de ranhuras a partir das partículas aderida.

**Figura 13. Mecanismo de formação de ranhuras a partir da partícula aderida.**



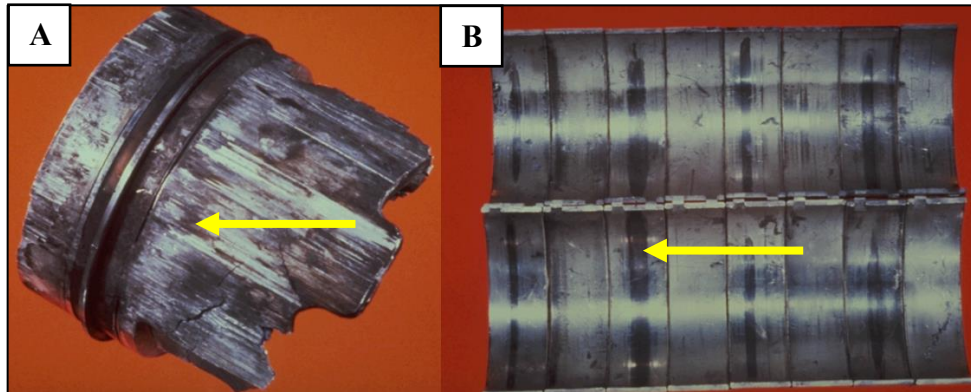
Fonte: Stachowiak e Batchelor (2005).

O início da falha por desgaste adesivo pode ser identificado através da inspeção dos aspectos visuais das superfícies. Os primeiros sinais a serem identificados na etapa de visualização são o surgimento de marcas de polimento e manchas escurecidas, indicando que as temperaturas de fusão foram atingidas.

A Figura 14 mostra a visualização das manchas e polimento nas superfícies de um pistão e de rolamentos, respectivamente. O pistão mostrado operou até a sua deterioração em decorrência da falta de lubrificante para seu arrefecimento. Na superfície dos rolamentos o

problema ocorreu por falta lubrificante. Em ambos os casos é possível perceber a presença de polimento e mancha escurecidas (CATERPILLAR, 2020).

**Figura 14. Visualização de manchas e polimento na superfície de um pistão (A) e de rolamentos (B) em decorrência da adesão.**



Fonte: CATERPILLAR (2020).

Para essa classe de desgaste o uso de lubrificantes apresenta-se como uma solução viável para minimizar o problema. A lubrificação tem como intuito a formação de um filme de baixa resistência ao cisalhamento, acarretando a diminuição da resistência do contato, proporcionando a redução da fricção, e o arrefecimento resfria o sistema dissipando o excesso de calor presente no meio.

### 2.3.1.2 *Desgaste corrosivo*

O fenômeno da corrosão pode ser dito como uma transformação química que gera a deterioração da superfície de um metal em decorrência das características do meio ao qual este está sendo exposto. Neste tipo de desgaste são formados produtos de reações químicas e eletroquímicas. Também chamadas de reações triboquímicas, estas produzem uma intercama na superfície popularmente chamada de ferrugem, que posteriormente, pode ser removida gerando a exposição do material para que o processo se reinicie (RADI et al., 2007).

Segundo Stoeterau e Leal (2004) esse processo, inicialmente apresenta alta reatividade, porém, posteriormente, a taxa de corrosão vai diminuindo a medida a camada de óxidos vai se formando, cobrindo a superfície correspondente ao material original.

De acordo com o guia de análise de falha aplicada da Caterpillar (2020), a corrosão pode ser dividida, principalmente em: corrosão geral, corrosão galvânica e corrosão em função da temperatura.

Na corrosão geral, a corrosão ocorre na superfície exposta de um metal devido ao contato com um eletrólito. A corrosão geral pode ser do tipo generalizada ou localizada. Gentil (2003), caracteriza a corrosão generalizada como um processo que consiste no ataque que atinge toda a superfície metálica em contato com o meio corrosivo, dessa forma, ocorrendo perda uniforme de espessura.

Já a corrosão localizada é caracterizada pela remoção seletiva do metal em pequenas áreas sobre a superfície metálica. De acordo com Ramanathan (1988), esse tipo de corrosão se inicia em regiões que apresentam certa heterogeneidade, seja ela presente no material ou no ambiente. Dentre os tipos de corrosão localizada podemos citar a corrosão por pites, por frestas e por atrito.

Na Figura 15 podemos observar uma biela com marcas de corrosão geral, na qual o eletrólito em contato com a superfície do metal foram gotas de água, que acabaram por gerar pites (corrosão localizada) que se desenvolveram ao decorrer do tempo. Este tipo específico de corrosão por pites pode ser muito prejudicial em metais com áreas sob elevados carregamentos.

**Figura 15. Biela de um motor com marcas de corrosão por pites**



Fonte: CATERPILLAR (2020).

Na corrosão galvânica, há a presença de dois metais diferentes expostos a uma solução eletrolítica. Alguns metais são mais ativos que outros e quando se utiliza dois metais diferentes, há, então, entre eles uma diferença de potencial, causando uma transferência de carga elétrica de um para outro, logo o mais ativo (ânodo) tende a sofrer corrosão (Gentil, 2003).

Na Figura 16, temos um tubo de resfriamento de óleo de baixo fluxo composto por dois metais, cobre e aço. O óleo que percorria o tubo estava contaminado por um ácido, fazendo com que o processo de corrosão do cobre (ânodo) fosse acelerado. Logo, nesse caso temos a

presença de corrosão geral que acabou contribuindo com o processo de corrosão galvânica (CATERPILLAR, 2020).

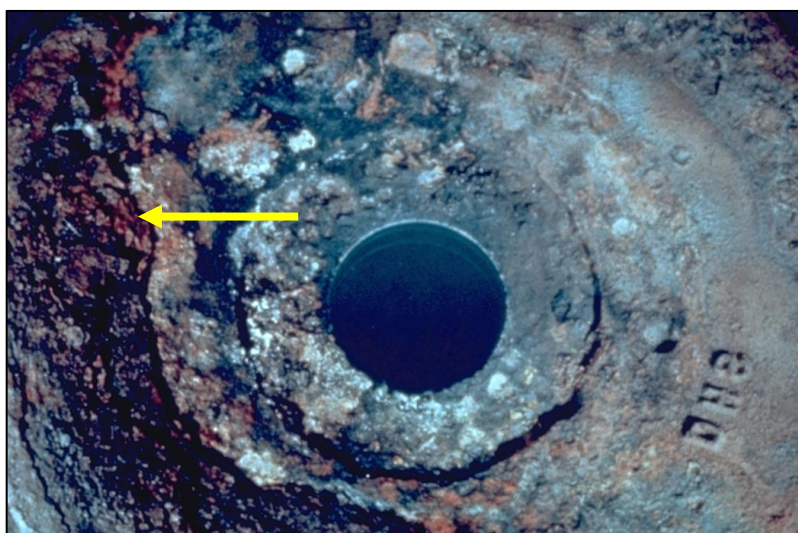
**Figura 16. Tubo de aço e cobre sob processo de desgaste corrosivo geral e galvânico.**



Fonte: CATERPILLAR (2020).

E por fim, a corrosão em função da temperatura ocorre na superfície quente de um metal, a qual quando exposta ao ar, sofre oxidação. Nesse tipo de desgaste não é necessária a presença de um eletrólito líquido para que o metal sofra oxidação. Em condições de temperaturas mais altas, os átomos do metal se movem rapidamente em decorrência do aumento no grau de excitação dos mesmos, permitindo assim, que os átomos de oxigênio presente no ar se combinem mais facilmente com os átomos do metal (CATERPILLAR, 2020). Na figura 17 temos um protetor térmico de um turbo compressor degradado em decorrência da corrosão de alta temperatura.

**Figura 17. Protetor térmico de um turbo compressor degradado por corrosão de alta temperatura.**



Fonte: CATERPILLAR (2020).

Normalmente, em metais ou ligas metálicas que, expostos a uma atmosfera em altas temperaturas, formem compostos óxidos. Estes óxidos possuem uma estabilidade química muito alta, que é demonstrada pelos seus pontos de fusão, que são muito elevados em comparação com o ponto de fusão do próprio metal ou liga metálica. Assim, pela facilidade de alguns metais reagirem com o oxigênio atmosférico, estes chegam a se oxidar em temperatura ambiente (SHACKELFORD, 2008).

De acordo com Archard (1980), a temperatura do meio atua como um dos fatores que mais influenciam no desgaste corrosivo. Uma vez que a corrosão está diretamente relacionada a temperatura dos processos, um aumento da temperatura ocasiona um incremento exponencial da reatividade para processos termicamente ativados.

Dessa forma, mesmo que, em certos casos, a temperatura não seja o fator principal a desencadear um processo de corrosão, para casos onde um item previamente já apresenta pontos de desgaste (corrosão localizada, uniforme ou galvânica), a temperatura acaba potencializando o desgaste corrosivo para essas situações (ARCHARD, 1980).

## 2.4 EMBREAGEM DE DIREÇÃO E FREIO

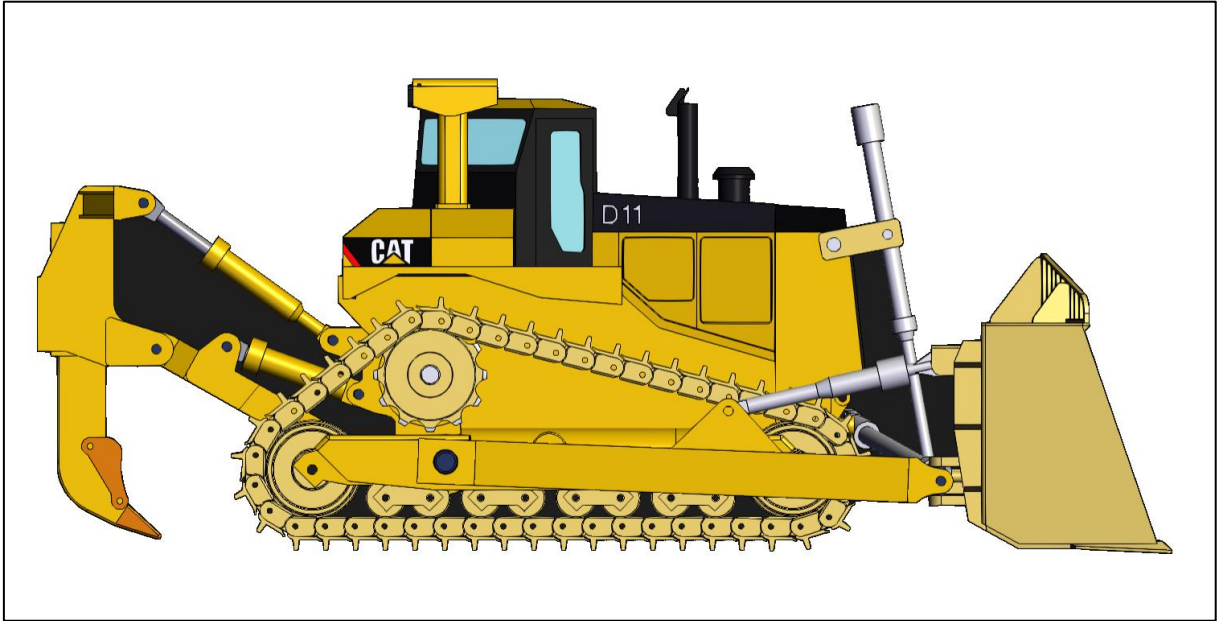
Embreagens e freios são essencialmente o mesmo dispositivo, no qual cada um fornece uma conexão de atrito que pode ser mecânica, hidráulica ou magnética entre dois elementos. Se os elementos interligados podem rodar, então tem-se uma embreagem. Se um dos elementos roda e o outro é fixo, caracteriza-se um freio (NORTON, 2013).

Embreagens e freios são utilizados extensivamente em inúmeros tipos de aplicações industriais, não somente para fornecer condições de marcha lenta a um veículo em função da necessidade de parar seu movimento e permitir que o motor continue funcionando quando o veículo está parado. Além disso, as embreagens também podem ser utilizadas para manter um torque constante em um eixo de tensionamento e como dispositivo de desconexão de emergência, uma vez que é capaz de separar o eixo do motor em casos de emperramento. Por sua vez, freios, em situações de emergência, podem ser acionados para gerar uma rápida parada em equipamentos.

Norton (2013) cita que alguns fabricantes fornecem combinações de embreagens e freios em um único componente, no qual a aplicação de potência desativa o freio e aciona a embreagem de direção, o que torna o componente único mais seguro contra falhas. Esses tipos de dispositivo geralmente são aplicados em máquinas pesadas e grandes, como no caso dos

tratores de esteiras do tipo D11 mostrado na Figura 18, largamente utilizados em atividades de mineração com produções ininterruptas.

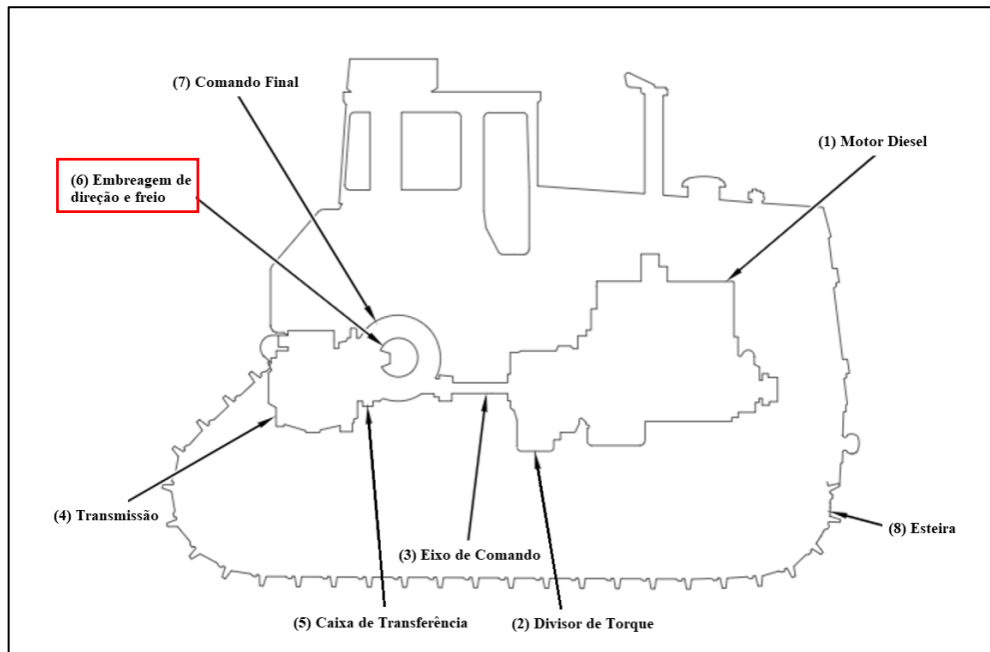
**Figura 18. Vista esquerda de um trator de esteiras D11.**



Fonte: GrabCad (2021).

Em um trator de esteira o motor diesel envia a potência do volante do motor para o divisor de torque, que por sua vez encaminha a potência do eixo de comando principal através do sistema de engrenagem planetária e através de um conversor de torque. Através do eixo de comando principal, a potência chega até a transmissão. Ao mover o controle rápido para uma posição de velocidade e posição de sentido, a potência através da transmissão vai para a caixa de transferência, que então, gira dois semieixos internos que a enviam para as embreagens de direção e freio. Todos os componentes do trem de força da máquina podem ser observados na Figura 19 (CATERPILLAR, 2021).

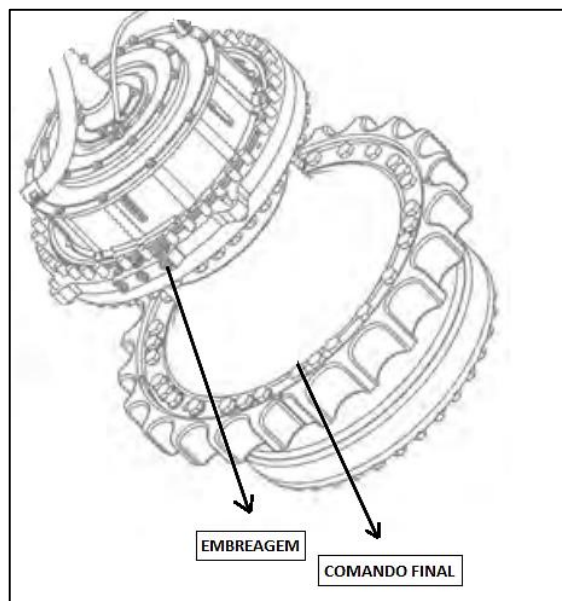
**Figura 19. Trem de força de um trator de esteiras D11.**



Fonte: Adaptado de CATERPILLAR (2021).

As embreagens usadas para manobrar os tratores de esteira comportam os sistemas de direção e freio em um único componente, de forma que os freios param o trator e auxiliam as embreagens de direção em curvas. Como mostra a Figura 20, este componente é diretamente acoplado ao comando final do trator (CATERPILLAR, 2021).

**Figura 20. Ilustração da embreagem de direção e freio acoplada ao comando final.**



Fonte: Adaptado de CATERPILLAR (2021).

A potência através das embreagens é usada para girar dois semieixos externos que, por sequência, giram os comandos finais do trator que proporcionam uma redução dupla usando as engrenagens planetárias e enviam a potência para as esteiras, que por fim, movem o trator (CATERPILLAR, 2021).

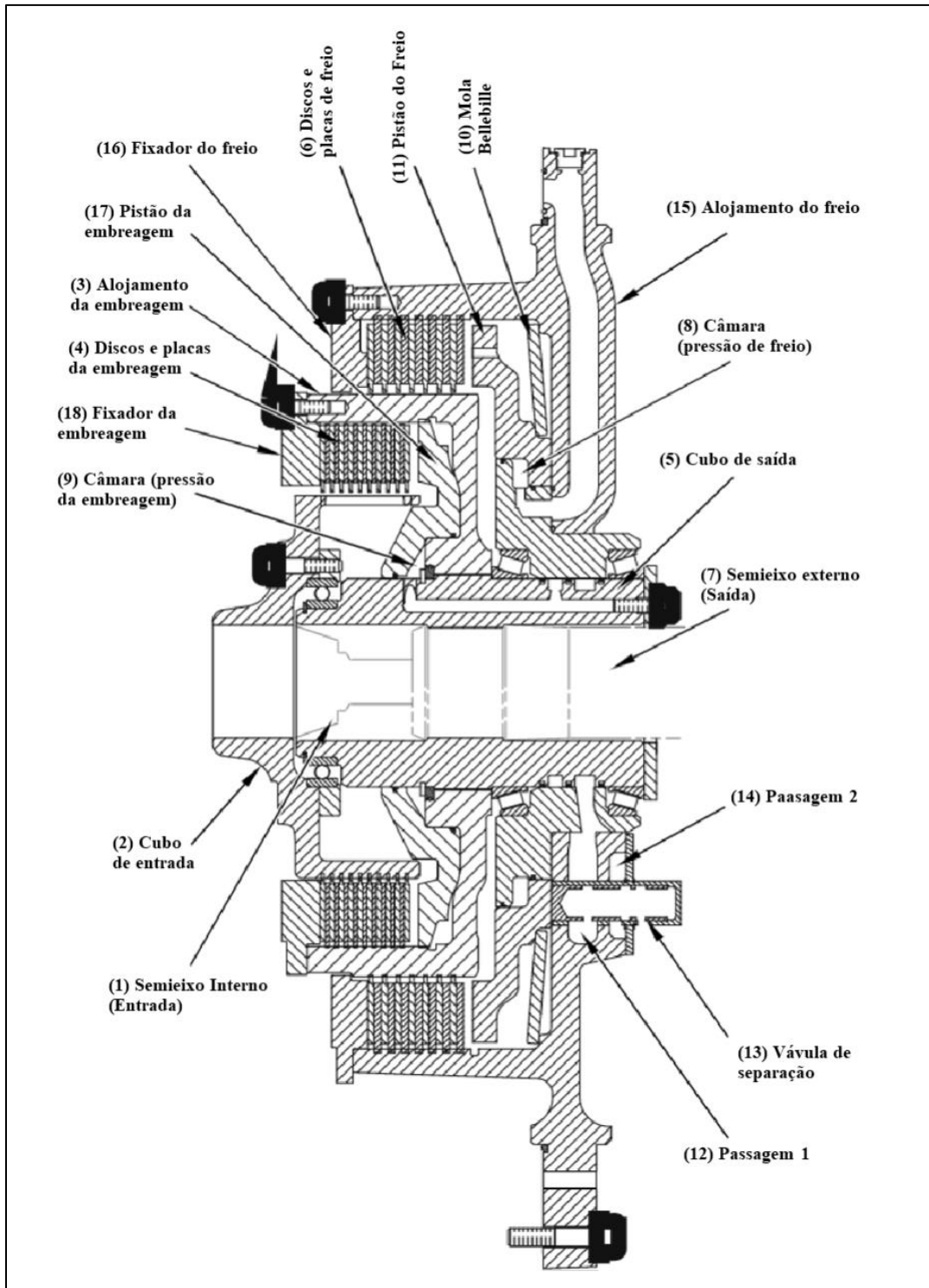
#### **2.4.1 Princípio de funcionamento**

O funcionamento da embreagem, tanto para o sistema de direção quanto para o sistema de frenagem, se baseia na ficção entre discos e placas separadoras. Cada conjunto apresenta seus discos de fricção e placas separadoras independentes conforme mostrado no desenho do componente disposto na Figura 21. Os discos são feitos através da combinação de aço, bronze e celulose, caracterizando uma liga capaz de possibilitar o aumento da vida útil em aplicações com elevado desgaste. A face de fibra porosa em cada lado do disco ajuda a garantir que o filme fino de óleo separe os discos e as placas a fim de impedir contato direto. O fluxo constante de fluido de arrefecimento que atravessa os discos e chapas possibilita dissipação contínua de calor evitando desgaste e danos em decorrência de aquecimento (CATERPILLAR, 2021).

As placas separadoras, que separam as múltiplas camadas do material de fricção, são confeccionadas em aço e tratadas termicamente atender às especificações do fornecedor quanto à dureza e à microestrutura do material (CATERPILLAR, 2021).

Em seu funcionamento, o componente recebe a potência da coroa da caixa de transferência pelo semieixo interno, que em seguida é enviada para o cubo de entrada que está conectado ao alojamento da embreagem pelas placas e discos da mesma. Através dos discos e das placas de freio, o cubo de saída também se conecta, por estrias, ao alojamento da embreagem. De forma a concluir o circuito funcional, o cubo de saída junto ao semieixo externo encaminha, então, a potência aos comandos finais do trator, conforme mostra a Figura 21 (CATERPILLAR, 2021).

Figura 21. Visualização transversal de uma embreagem de direção e freio de um trator de esteiras.



Fonte: Adaptado de CATERPILLAR (2021)

Durante o movimento da máquina em linha reta, o óleo de pressão é enviado para as câmaras da embreagem e do freio pelas passagens internas. Esse óleo de pressão mantém os freios na posição liberada e as embreagens de direção na posição engatada. Quando a potência da coroa é enviada através do semieixo interno para o cubo de entrada, o alojamento da

embreagem gira o cubo de saída e o semieixo externo envia potência para os comandos finais (CATERPILLAR, 2021).

A partir do momento em que uma das alavancas de controle de direção é acionada, a pressão de óleo que é enviada para a câmara da embreagem diminui para 0 kPa, liberando a embreagem de direção. Embora o cubo de entrada ainda gire, nenhuma potência é enviada através do semieixo externo, ocasionando o giro gradual do trator (CATERPILLAR, 2021).

Quando se puxa a alavanca de controle totalmente para trás, a embreagem de direção é liberada. A pressão do óleo enviado para a câmara do freio mede aproximadamente 220 kPa, permitindo que a mola Belleville empurre o pistão do freio para engatá-lo. O alojamento da embreagem, então, mantém o cubo de saída e o semieixo externo estacionários, resultando em uma curva fechada e rápida (CATERPILLAR, 2021).

A válvula de separação é utilizada para controlar a quantidade de óleo lubrificante que vem do coletor de lubrificação para os discos e as placas de freio através da passagem 1. Quando os freios são desengatados, o pistão do freio empurra a válvula de separação para dentro do alojamento do mesmo, o que limita o fluxo de óleo para a passagem e para os discos e as placas de freio. Quando os freios são engatados, o pistão do freio se move para longe do alojamento do freio e permite que a válvula de separação se distancie do alojamento, permitindo que o fluxo de óleo para a passagem 2 aumente, dessa forma, os discos e as placas de freio recebem mais óleo para lubrificação e arrefecimento e funcionam corretamente (CATERPILLAR, 2021).

### 3 METODOLOGIA ACR

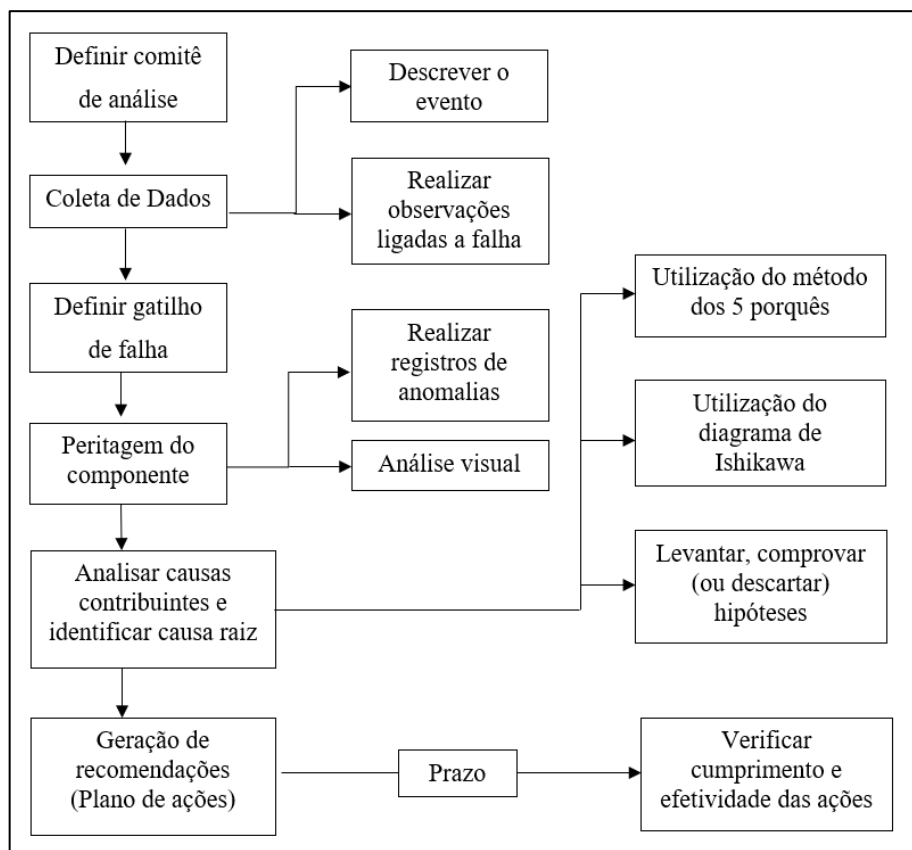
Será apresentado, neste capítulo, as etapas da metodologia de Análise de Causa Raiz (ACR) aplicada a uma falha prematura de uma embreagem de direção e freio. Este trabalho objetiva explorar e descrever os parâmetros decorrentes do método de análise apresentado de forma prática e aplicada a um componente, apresentando resultados qualitativos para o processo com bases em fatos consolidadas durante o procedimento analítico.

A metodologia ACR é amplamente utilizada nas indústrias para análise de falhas em componentes e/ou equipamentos. Tal metodologia fornece embasamento suficiente para uma análise efetiva e aprofundada do problema em questão com a participação de profissionais especialistas que fornecem confiabilidade ao processo de forma a eliminar todas ou grande parte das causas que prejudicam o desempenho requerido de um devido equipamento ou processo industrial.

Os dados utilizados neste trabalho foram levantados em uma multinacional do ramo da mineração atuante no sudeste paraense. O objeto de estudo se concentrou em uma embreagem de direção e freio, componente do trem de força de um trator de esteira utilizado em atividades de decapeamento que foi acometido pela falha a ser analisada. Dessa forma, o problema será estudado através de informações que comprovem ou descartem possibilidades levantadas para a causa raiz do evento. Para isso, deve-se utilizar ferramentas de análise que possam direcionar as ações a serem definidas para conter futuras recorrências da falha a ser tratada.

Com base nas etapas estabelecidas por Rooney e Heuvel (2004) e Telles (2019) criou-se o fluxograma de etapas, mostrado na Figura 22, para o caso específico a ser analisado com o intuito de observar com maior abrangência todas as etapas envolvidas na sequência analítica.

Figura 22. Etapas a serem aplicadas para a identificação e contenção da falha da embreagem.



Fonte: Autoria própria (2021).

### 3.1 COMITÊ DE ANÁLISE

O comitê de análise é composto por todos os especialistas envolvidos que são necessários para a condução da análise de falha. Todo o processo de identificação da causa raiz foi direcionado e acompanhado pelo autor deste trabalho durante o período de estágio supervisionado na organização em questão. Durante a análise contou-se com o apoio dos seguintes profissionais: engenheiro mecânico, técnico perito, técnico controlador de componentes (facilitador), dois mecânicos e um operador de máquinas pesadas.

O engenheiro mecânico contribuiu através do auxílio com bibliografias de falhas e no auxílio da condução primária da análise. O técnico controlador de componentes, atuou como facilitador de informações, sendo responsável por fornecer dados referente a embreagem de direção e freio, como horímetros, vida útil, dados de instalação e remoção e etc.

Contou-se também com auxílio de um perito especializado, sendo este responsável por conduzir a peritagem do componente defeituoso a nível analítico. Na atividade, a embreagem foi desmontada para avaliação visual do seu estado após a falha. Durante a peritagem, foi

necessário contar com o auxílio de dois mecânicos, que, foram responsáveis por conduzir o processo de desmontagem da embreagem através do manuseio de ferramentas apropriadas.

E por fim pode-se citar a contribuição do operador do equipamento, sendo este o funcionário que operava o trator de esteiras no ato da falha, logo, atuando como fonte primária de informações sobre o evento.

### 3.2 COLETA DE DADOS

Conforme definido por Rooney e Heuvel (2004), para a devida realização de uma análise de causa raiz é necessário, primeiramente, compreender o evento associado a falha. Para isso, deve ser realizada a coleta de informações e dados de natureza operacional, de manutenção e de projeto, para que o processo analítico possa ser direcionado de forma a determinar a causa primordial da falha.

O trator de esteiras, classe D11, que comportava a embreagem de direção e freio foi capitalizado em 2018 para aplicação em atividades de decapeamento, ou seja, para a retirada da camada de terra depositada sobre a rocha para a exposição de minério. A falha do componente do sistema de trem de força do trator resultou em aproximadamente 5,53 horas de improdutividade associado ao equipamento. A Tabela 2 mostra os dados do evento de falha da embreagem de direção e freio.

**Tabela 2. Dados do evento de falha da embreagem de direção e freio.**

Data e hora - Início	01/11/2020 04:34
Data e hora - Fim	01/11/2020 10:02
Duração	5,53 horas
Tipo	Manutenção Corretiva
Ocorrência	Falha no giro da embreagem LD. Componente travado.
Sistema	Trem de força
Componente	Embreagem

Fonte: Autoria própria (2021).

A falha na embreagem do trator foi identificada em virtude das restrições para a realização de curvas pelo equipamento. As restrições de movimento ocorrem devido ao não funcionamento adequado do freio da embreagem instalada no lado direito do trator. Tal falha aconteceu em campo e foi imediatamente informada pelo operador à central de controle da oficina. Após o acionamento do setor de manutenção mecânica o ativo entrou em processo de

manutenção corretiva para a substituição do componente. Como o trator contava com um parque de componentes sobressalentes para suprir danos ou falhas seu tempo de parada para reparo não impactou significativamente na produtividade da organização.

Conforme indicado nos dados de instalação do componente na Tabela 3, até o momento do evento corretivo, a embreagem havia operado apenas 2256 horas, sendo que a vida útil do mesmo estimada pelo seu fabricante é de 12000 horas, dessa forma, a embreagem veio a falhar com um horímetro correspondente a apenas 21,38% de sua vida útil estimada.

**Tabela 3. Dados de instalação e remoção da embreagem de direção e freio.**

INSTALAÇÃO	Data de instalação	04/06/2020
	Componente	Embreagem de direção e freio
	Posição	Lado direito
	Temperatura média de operação (Fabricante)	95°C
	Vida útil do componente (Fabricante)	12000 horas
REMOÇÃO	Data da remoção	01/11/2020
	Tipo de substituição	Corretiva
	Horímetro do componente	2566 horas
	Natureza	Prematura

Fonte: Autoria própria (2021).

### 3.2.1 Gatilho de falha

Um gatilho de falha trata-se de uma situação em que a falha implique em parada de algum equipamento ou área a partir de um tempo pré-definido. Como base nos gatilhos sugeridos por Telles (2019), utilizou-se o item referente a falha prematura, uma vez que a embreagem falhou horímetro abaixo de 80% ( $21,38\% < 80\%$ ) da vida útil projetada para o mesmo.

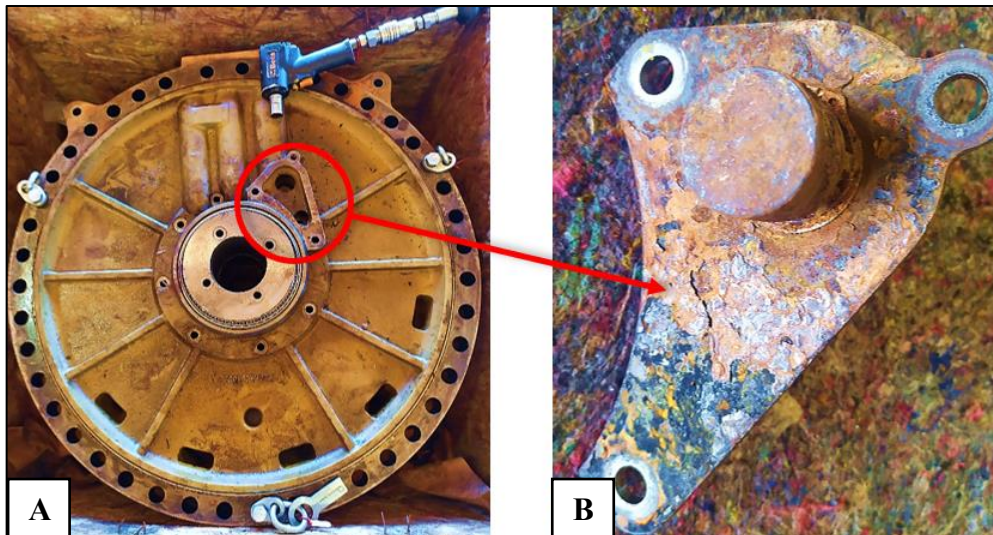
### 3.2.2 Peritagem da embreagem

Antes do início efetivo da análise de causas da falha, deve se avaliar os danos físicos causados na embreagem, havendo então a necessidade da realização de uma peritagem detalhada para auxílio no diagnóstico da falha. Essa atividade apresenta caráter descritivo, dessa forma, trata-se de uma análise visual minuciosa com o intuito de documentar e avaliar os efeitos físicos da falha no componente.

Após a retirada da embreagem defeituosa do trator, a mesma foi encaminhada para a área de serviços no pátio da oficina para o início do processo de seu desmonte. Durante a desmontagem, foi possível identificar alto grau de oxidação na válvula de separação da embreagem. A alta quantidade de ferrugem encontrada no item, por sua vez, ocasionou o seu travamento, interferindo em seu funcionamento.

A válvula de separação é responsável por arrefecer o conjunto de freio e controlar a quantidade de óleo lubrificante necessário para que não haja atrito entre discos de fricção e placas separadoras do conjunto conforme a demanda de frenagem do trator durante sua operação. A Figura 23 mostra os detalhes da válvula deteriorada de forma que a alta quantidade de ferrugem presente no item acarretou no seu travamento, comprometendo consequentemente, o seu funcionamento.

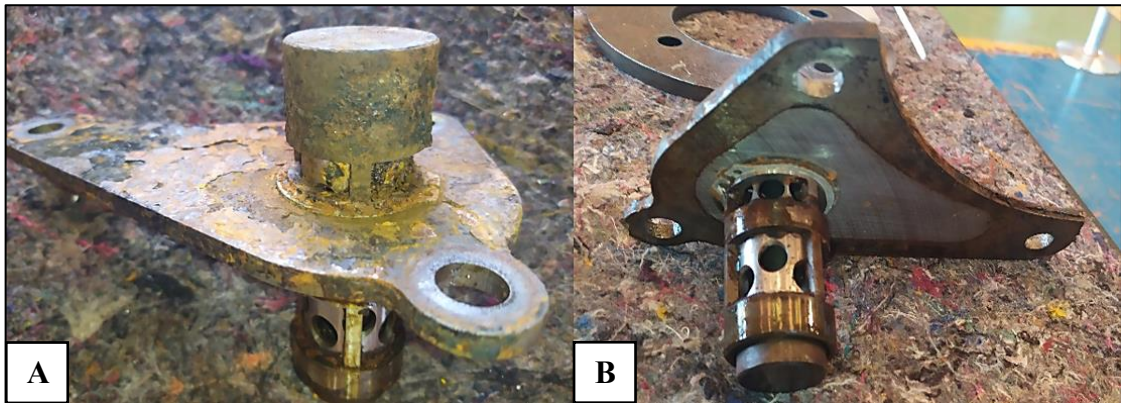
**Figura 23. Local de instalação da válvula na embreagem (A). Item sob alto grau de oxidação (B).**



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 24 é possível observar o aspecto externo e interno da válvula separadora, sendo assim, possível perceber que, as marcas de corrosão estavam presentes apenas na parte superior da superfície externa exposta da válvula, enquanto que sua parte interna não apresentou as mesmas evidências.

**Figura 24. Aspecto externo (A) e interno (B) da válvula separadora.**



Fonte: Autoria própria (2020).

Partindo para a parte interna da embreagem, avaliou-se, a princípio, a integridade das juntas de vedação do componente dispostas na Figura 25, na qual é possível observar o bom estado dos itens, descartando assim, futuras hipóteses ligadas a vazamentos.

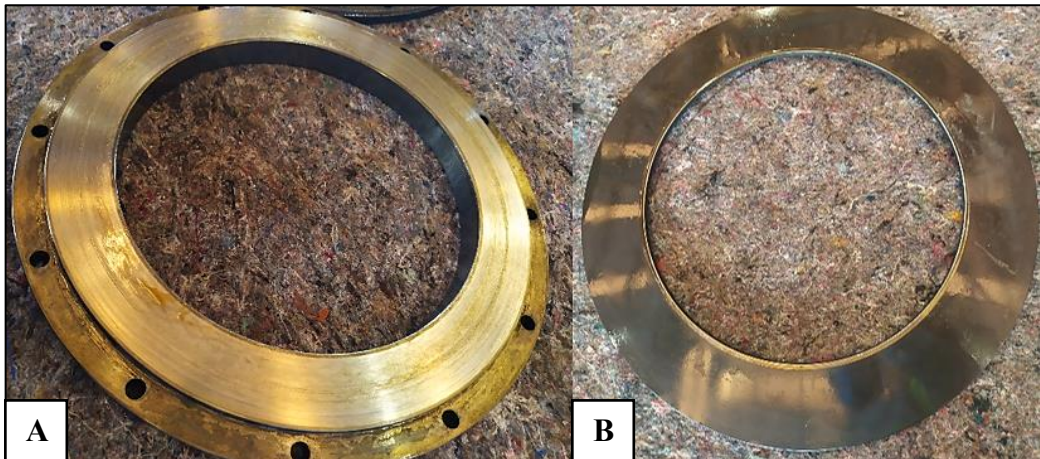
**Figura 25. Integridade das vedações da embreagem.**



Fonte: Autoria própria (2020).

Como procedência da atividade, avaliou-se a condição dos fixadores e pistões dos conjuntos de direção e freio. A Figura 26, mostra, respectivamente, o fixador e o pistão do conjunto de direção de embreagem, ambos com boa integridade e sem marcas de falha.

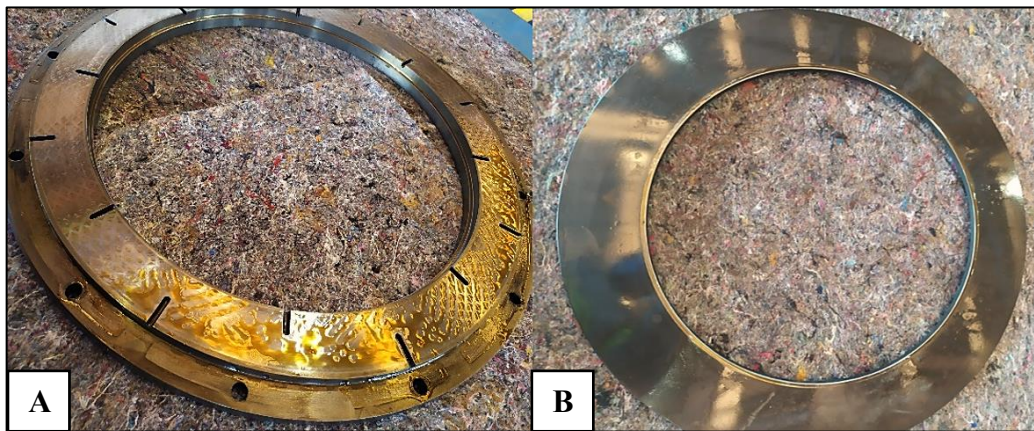
**Figura 26. Fixador (A) e pistão (B) do conjunto de direção da embreagem.**



Fonte: Autoria própria (2020).

O mesmo pôde ser observado para o conjunto de freio, o fixador, ainda com a presença de um pouco de lubrificante escurecido, e pistão apresentaram boa integridade, sem marcas consideráveis de falha. Os itens podem ser observados na Figura 27.

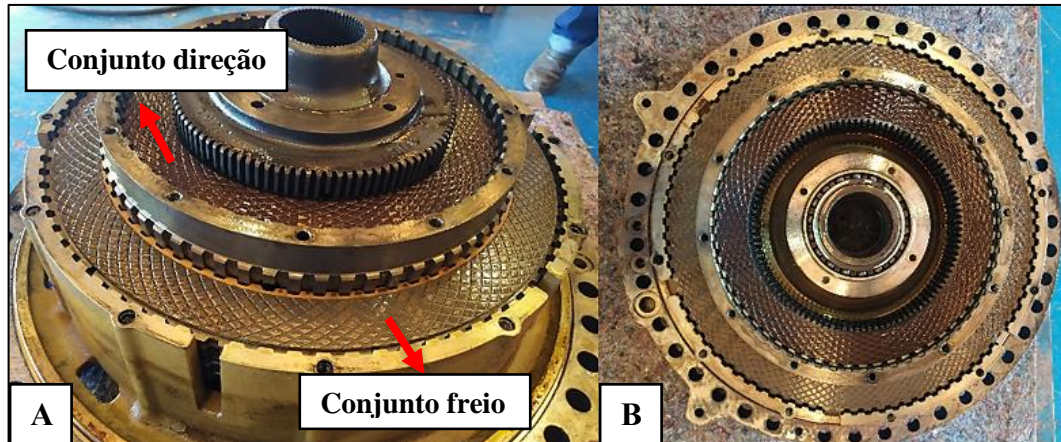
**Figura 27. Fixador (A) e pistão (B) do conjunto de freio da embreagem.**



Fonte: Autoria própria (2020).

Em seguida foi avaliada a integridade superficial dos conjuntos de direção e freio montados, onde, é possível enxergar, na Figura 28, apenas o primeiro disco de fricção de ambos os conjuntos, também em bom estado.

**Figura 28. Integridade superficial dos conjuntos de direção e freio da embreagem, respectivamente, em vista isométrica (A) e vista superior (B).**



Fonte: Autoria própria (2020).

Por conseguinte, para melhor avaliar a integridade dos discos de fricção e placas separadoras de ambos os conjuntos, foi realizado o procedimento de medição da espessura dos itens e posterior comparação com valores tabelados e normatizados pelo fornecedor da embreagem. As especificações do fabricante para a espessura dos itens dos conjuntos de direção e freio da embreagem podem ser observadas no ANEXO A.

A espessura total dos conjuntos, sendo os sete discos intercalados com sete placas para o conjunto de freio e dez discos intercalados com nove placas para o conjunto de direção, foram aferidas com uso de um paquímetro conforme mostra a Figura 29.

**Figura 29. Medição da espessura total do conjunto de direção.**

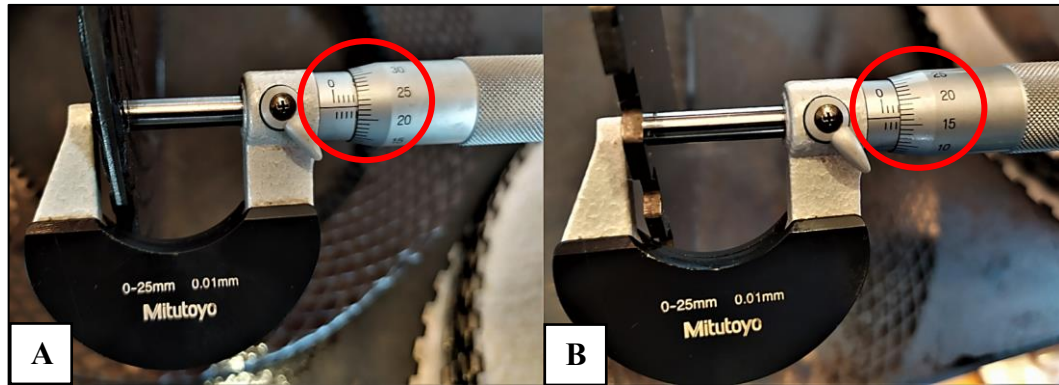


Fonte: Autoria própria (2020).

Para a medição das espessuras de forma individual de cada disco de fricção e cada placa separadora de ambos os conjuntos contou-se com a utilização de um micrômetro, conforme

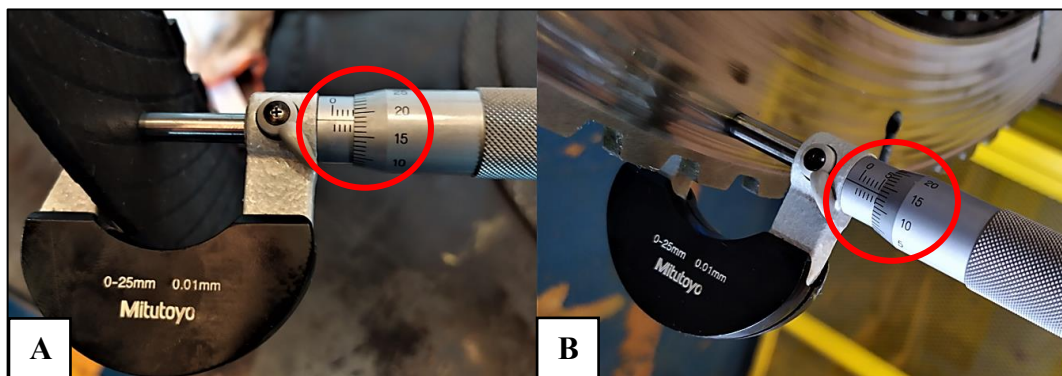
mostra, respectivamente, a Figura 30 e a Figura 31. Os valores medidos para todos os discos e placas dos conjuntos de direção e freio da embreagem, de forma individual, podem ser observados no APÊNDICE A.

**Figura 30. Medição dos itens do conjunto de direção. Disco de fricção (A). Placa separadora (B).**



Fonte: Autoria própria (2020).

**Figura 31. Medição dos itens do conjunto de freio. Disco de fricção (A). Placa separadora (B).**



Fonte: Autoria própria (2020).

Por conseguinte, os valores de espessura aferidos, conforme mostrados nas Figuras 29, 30 e 31, foram comparados aos valores indicados pelo fabricante. Os dados de medição de referência são mostrados na Tabela 4.

**Tabela 4. Comparação das espessuras medidas dos conjuntos de direção e freio com os dados do fabricante da embreagem.**

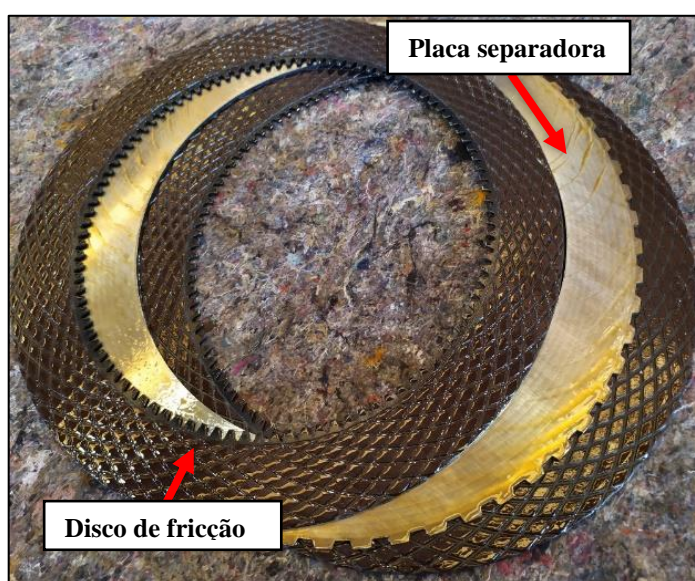
Conjunto	Espessura (fabricante) em mm	Espessura (medida) em mm	Itens	Espessura (fabricante) em mm	Espessura (medida) em mm
Direção	$75,575 \pm 2,675$	75,25	Discos	$4,70 \pm 0,20$	4,74
			Placas	$3,175 \pm 0,075$	3,17
Freio	$80,920 \pm 1,085$	70,05	Discos	$5,56 \pm 0,08$	4,18
			Placas	$6 \pm 0,075$	5,63

Fonte: Autoria própria (2021).

Conforme mostrado na Tabela 4, os valores das medições para os discos e placas do conjunto de direção estão dentro da faixa do que estabelece o fabricante, tanto no aspecto da espessura total quanto nas medições individuais. Vale ressaltar que cada item foi medido apenas uma vez, apenas para méritos comparativos e de identificação de redução de espessura para o diagnóstico de desgaste.

A Figura 32, mostra a integridade dos itens do conjunto de direção do trator, que tiveram suas medições compatíveis com os valores do fabricante.

**Figura 32. Discos de fricção e placas separadoras do conjunto direção com boa integridade.**

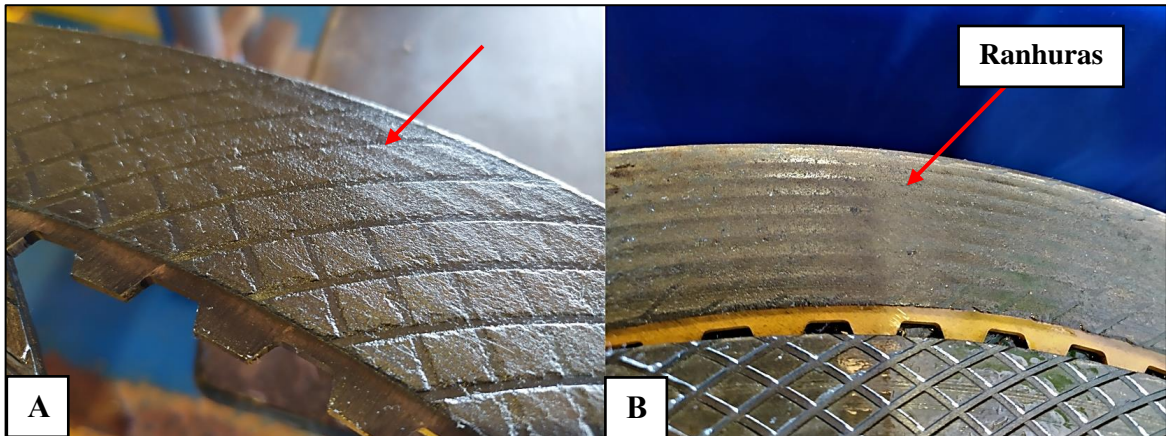


Fonte: Autoria própria (2020).

Por outro lado, os valores medidos para o conjunto de freios mostram-se abaixo daqueles estabelecidos pelo fabricante na comparação da Tabela 4, o que indica a ocorrência de desgaste durante seu período de operação.

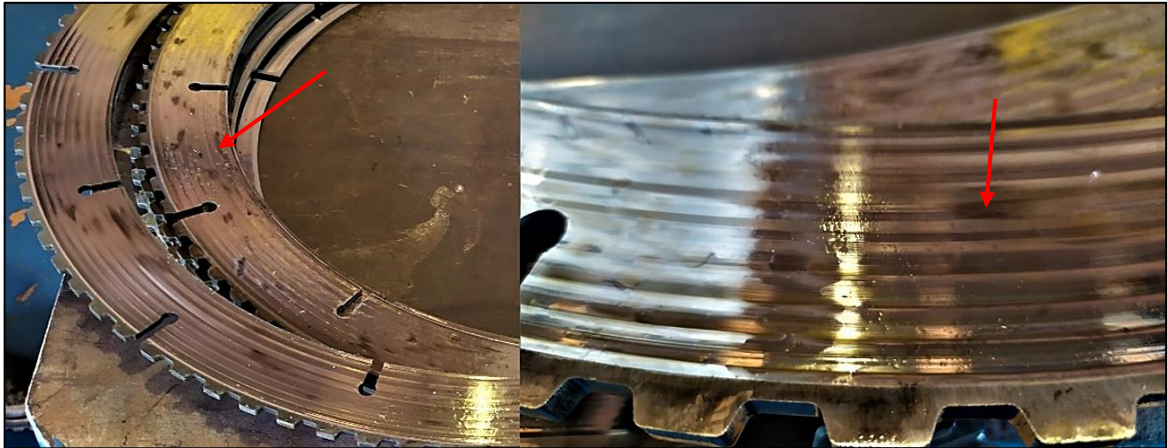
As Figuras 33 e 34 mostram, respectivamente, as superfícies dos discos de fricção e placas separadoras do conjunto de freio durante a peritagem. Na Figura 35 é possível observar discos de fricção com diferentes níveis de desgaste e ranhuras polidas com perfil característico do contato com as superfícies das placas separadoras. Da mesma forma, pôde-se observar na Figura 36, placas separadoras do mesmo conjunto com diversas manchas escuras.

**Figura 33. Desgaste mediano (A) e avançado (B) nos discos de fricção do conjunto freio.**



Fonte: Autoria própria (2020).

**Figura 34. Placas separadoras do conjunto freio com machas escurecidas.**



Fonte: Autoria própria (2020).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será apresentada as duas últimas etapas do processo de análise de causa raiz. A primeira delas é referente ao diagnóstico da falha com base nos aspectos visuais observados durante a peritagem do componente junto a aplicação das ferramentas selecionadas para o processo analítico, sendo estas o método dos cinco porquês e o diagrama de Ishikawa. A segunda e última etapa está relacionada com a geração de recomendações através do estabelecimento de ações corretivas para as causas da falha da embreagem de direção e freio. Além disso, conforme o estabelecimento de um prazo, será realizada a verificação do cumprimento e efetividade das ações estabelecidas.

### 4.1 ANÁLISE DE CAUSAS CONTRIBUINTES E CAUSA RAIZ

Considerando as evidências obtidas através da peritagem da embreagem de direção e freio, a análise aponta a ocorrência de dois tipos de desgastes associados a diferentes aspectos observados nos itens do conjunto de freio durante a análise visual. O primeiro tipo foi o desgaste corrosivo identificado na válvula separadora da embreagem, no qual o item teve seu funcionamento interrompido devido ao alto grau de oxidação encontrado no mesmo. Dessa forma, tal condição ocasionou o travamento da válvula a impedindo de exercer sua função, sendo esta a de manter o conjunto de freio arrefecido e lubrificado conforme a frenagem fosse solicitada pela máquina.

Logo, como o conjunto de freio estava operando sem condições adequadas de lubrificação e arrefecimento devido ao dano sofrido pela válvula separadora, houve então o superaquecimento do conjunto em decorrência do deslizamento (atrimento) gerado entre as superfícies dos discos e placas em contato, resultando assim, nas marcas de polimento encontradas nos discos de fricção do conjunto.

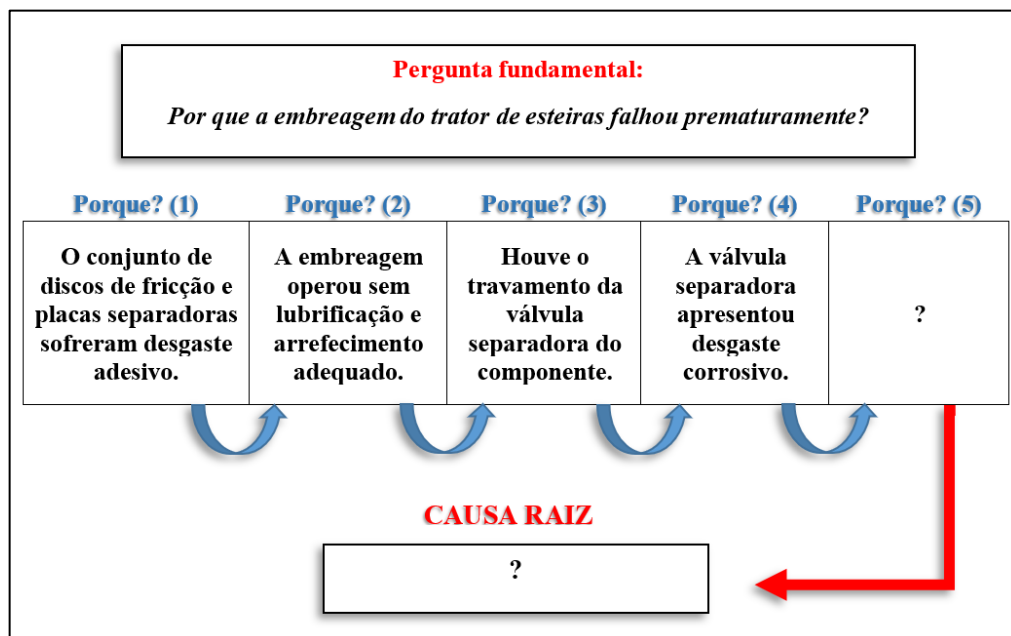
Com isso, tais condições foram responsáveis por gerar a ocorrência de um segundo tipo de desgaste, o adesivo, que por sua vez, foi responsável por gerar as manchas escurecidas na superfície das placas separadoras do conjunto. Sabe-se que neste tipo de desgaste, as superfícies com menor dureza tendem a apresentar maior desgaste em relação a superfície de maior dureza. Isso explica o alto nível de desgaste sofrido pelos discos de fricção que são feitos à base de aço, bronze e celulose, frente as placas separadoras que são fabricadas em aço endurecido termicamente.

Dessa forma, conforme definido por Radi et al. (2007), as manchas escuras identificadas na superfície das placas separadoras são resultado de ligações de adesão em certas regiões das superfícies em contato durante o superaquecimento. Frente a essa adesão, foi gerada uma deformação plástica nas regiões de contato da superfície do disco de fricção, que por sua vez, ocasionou a geração de trincas. Com a propagação destas trincas, houve então, durante o deslizamento das superfícies em contato, o desprendimento de partículas do disco de fricção e o depósito destas nas placas separadoras, gerando a transferência completa de material e dessa forma resultando no aspecto visual da placa separadora com pontos escuros após a ocorrência do desgaste.

#### 4.1.1 Aplicação do método dos cinco porquês

Através do método dos cinco porquês, elaborou-se a Figura 35 de forma a organizar a sucessão dos acontecimentos impondo uma sequência de questionamentos capazes de direcionar a análise. Com isso foi possível diferenciar causas e efeitos para gerar hipóteses plausíveis para a causa raiz do problema. A princípio o método deve responder a seguinte pergunta fundamental: “*Por que a embreagem do trator de esteiras falhou prematuramente?*”.

Figura 35. Aplicação do método dos cinco porquês ao problema.



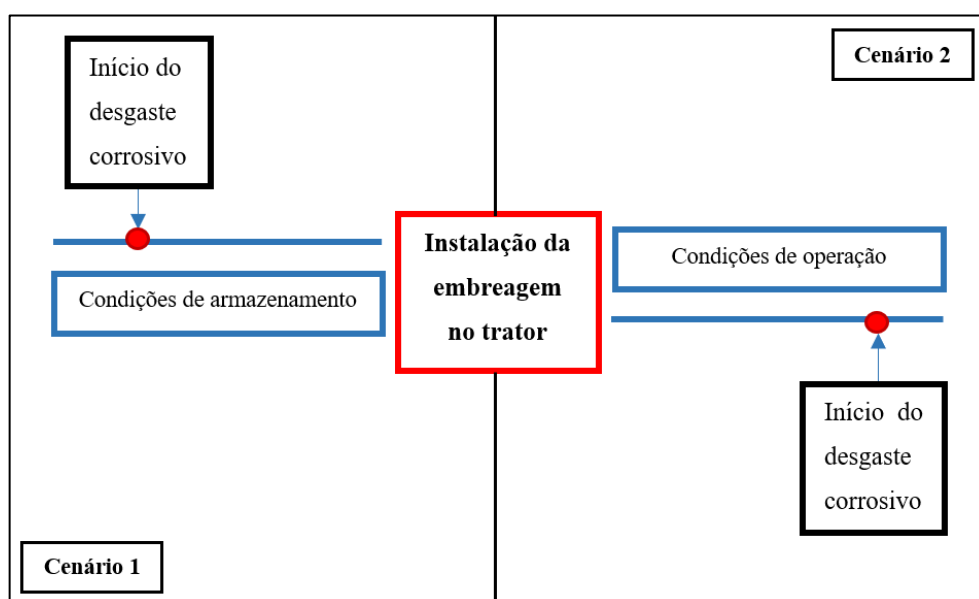
Fonte: Autoria própria (2021).

De acordo com a Figura 35, o sequenciamento de questionamentos impostos ao evento pelo método indicou como 1º porque para a falha prematura da embreagem, o desgaste adesivo sofrido pelos discos de fricção e placas separadoras do conjunto de freio. Como resposta ao primeiro questionamento teve-se o fato de o componente ter operado sob condições inadequadas de lubrificação e arrefecimento (2º porque), condição essa ocasionada pelo travamento da válvula separadora da embreagem (3º porque). A interrupção do funcionamento da válvula, então, ocorreu em decorrência do excesso de ferrugem acumulada na superfície externa do item por conta da ocorrência do desgaste corrosivo (4º porque).

Conforme mostrado na Figura 35, o quarto “porquê” não obteve sucessão, uma vez que, nesse estágio, a causa que levou a válvula separadora a sofrer desgaste corrosivo ainda era incerta.

Dessa forma, a sucessão da análise consistiu na identificação da origem do desgaste corrosivo de forma a entender que fatores foram propícios para o seu surgimento. Com isso foram estabelecidos dois cenários para a análise conforme as condições mostradas no esboço apresentado pela Figura 36. O primeiro cenário considera que o desgaste teve sua origem antes da aplicação da embreagem no trator, que corresponde ao período de armazenamento do componente. Por outro lado, o segundo cenário considera que o desgaste se originou após a aplicação da embreagem no trator, ou seja, durante a operação da máquina.

**Figura 36. Esboço dos cenários para análise em torno da origem do desgaste corrosivo da válvula separadora.**



Fonte: Autoria própria (2021).

A análise do cenário 1 está diretamente relacionada com a condição a qual o componente estava ao ser instalado no trator. Tal condição, por sua vez, está associada ao armazenamento da embreagem no período que antecede sua instalação. Dessa forma, com o objetivo de avaliar as condições de armazenamento dos componentes sobressalentes da frota de tratores, foi feita uma inspeção no galpão utilizado para comporta-los.

A Figura 37 mostra uma imagem da parte externa do galpão na qual é feito o armazenamento das peças da frota de tratores de esteiras, e nesta, é possível notar o mal estado de conservação do espaço dado a sua infraestrutura construída em armações composta por barras de aço envoltas por uma lona. Tudo isso, leva a caracterização de um espaço inadequado para a conservação de peças e componentes metálicos, pois não garante proteção adequada contra intempérie do ambiente, como chuvas e alagamento.

**Figura 37. Galpão de armazenamento de componentes.**



Fonte: Autoria própria (2021).

Os responsáveis pelo galpão mostrado na Figura 37 relataram que em período chuvoso, o mesmo apresenta áreas de alagamento que atingem os componentes lá armazenados, além disso os mesmos deixaram claro a necessidade de uma medida interventiva para eliminar esses problemas.

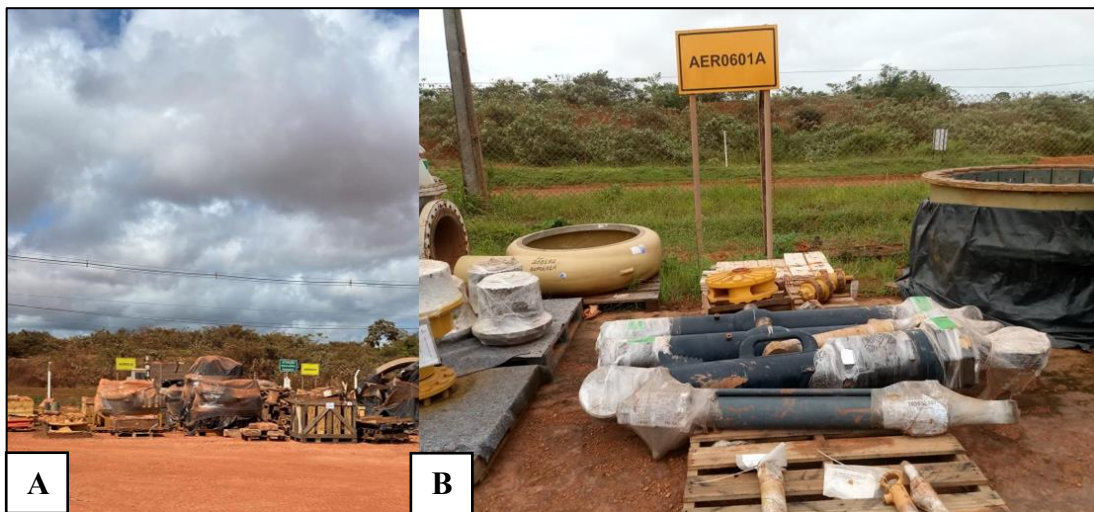
Outras falhas quanto ao cuidado no armazenamento dos componentes são mostradas nas Figuras 38 e 39. Nas imagens os componentes estão expostos as condições climáticas de sol e chuvas sem isolamentos ou proteção adequada e isso favorece um ambiente propício para que peças e equipamentos de metais oxidem com o tempo.

**Figura 38. Motor Diesel (A) e Trucks (B) em região externa ao galpão de armazenamento. Trucks (B) sem isolamento adequado e com marcas de oxidação.**



Fonte: Autoria própria (2021).

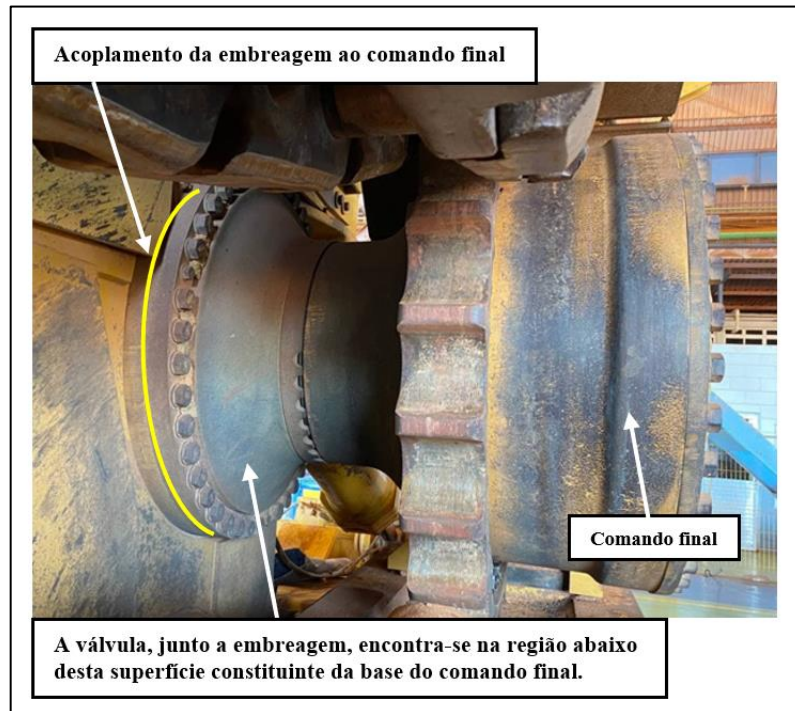
**Figura 39. Componentes em armazenamento externo (A). Cilindros hidráulicos sem isolamento adequado e com marcas de oxidação (B).**



Fonte: Autoria própria (2021).

Já o cenário 2, considera as possibilidades de o desgaste corrosivo da válvula separadora ter tido origem após a instalação da embreagem no trator. Para que um desgaste desse tipo pudesse se desenvolver na superfície superior da válvula do componente, a mesma teria que ser submetida ao contato com alguma substância de caráter corrosivo. Entretanto, conforme mostrado na Figura 40, as condições de instalação da embreagem e seu acoplamento ao comando final formam uma espécie de alojamento que por sua vez mantém a região da válvula protegida de intempéries climáticas como o contato com água da chuva.

**Figura 40. Acoplamento entre uma embreagem e um comando final em um trator de esteiras.**



Fonte: Autoria própria (2021).

Além disso, considerando que a própria embreagem e os componentes do trem de força adjacentes a ela, ou seja, instalados em seus extremos, sendo estes a caixa de transferência e o comando final, são componentes que comportam apenas óleos lubrificantes, conclui-se que, estas substâncias não apresentariam potencial corrosivo em um cenário onde um vazamento dessa natureza atingisse a superfície superior da válvula separada da embreagem.

Considerando o fator temperatura, vale ressaltar a temperatura média de operação do componente (95°C) não seria alta o suficiente para dar origem a um processo corrosivo na válvula. Porém considerando o cenário 1 no qual o item sofre oxidação devido a suas condições de armazenamento no período que antecede sua instalação no trator, a temperatura de operação da embreagem atuaria como fator agravante ao processo de corrosão da válvula separadora.

Conforme ressaltado por Archard (1980), a temperatura do meio atua como um dos fatores que mais influenciam no desgaste corrosivo. Neste caso, a temperatura contribuiu diretamente na reatividade entre os átomos de oxigênio presente no alojamento da válvula e os átomos da superfície de metal do item, dessa forma, acelerando o processo de corrosão do mesmo.

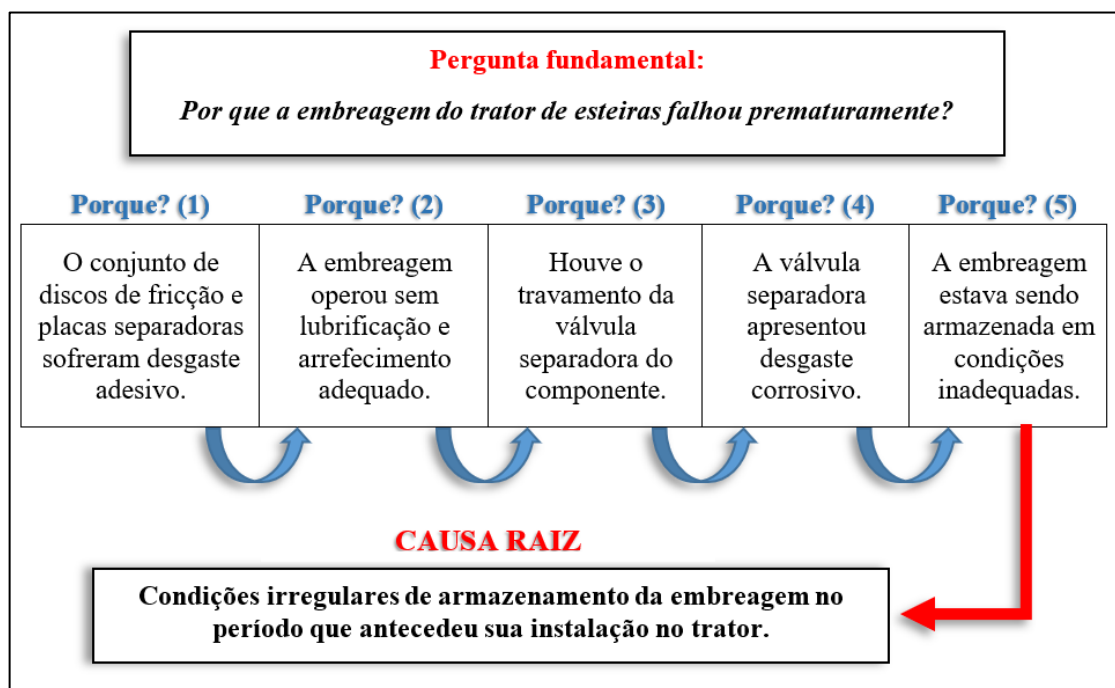
Além disso, vale ressaltar que embora a temperatura média de operação da embreagem seja de 95°C, esse valor é referenciado pelo fornecedor para condições normais de operação.

Porém, conforme o sistema de lubrificação e arrefecimento do conjunto de freio era cada vez mais comprometido pela perda de função da válvula separadora, mais a temperatura do mesmo aumentava em decorrência do atrito gerado entre os discos e placas do compartimento, gerando então, um ciclo que acelerava ainda mais o desgaste da própria válvula.

Com isso, em decorrência dos fatores observados e da análise de ambos os cenários apresentados, concluiu-se que a embreagem foi instalada no trator com a válvula separadora comprometida por oxidação, de forma que o desgaste corrosivo apresentado pelo item após a falha da embreagem se desenvolveu a partir das condições inadequadas a qual o componente estava armazenado no período antecessor a sua instalação (cenário 1). Dessa forma, pode-se então, descartar o cenário 2 apresentado.

Portanto, com a validação do cenário 1 e o descarte do cenário 2, chega-se então, a causa raiz da falha da embreagem de direção e freio do trator de esteiras conforme indica a Figura 41.

**Figura 41. Conclusão do método dos cinco porquês.**



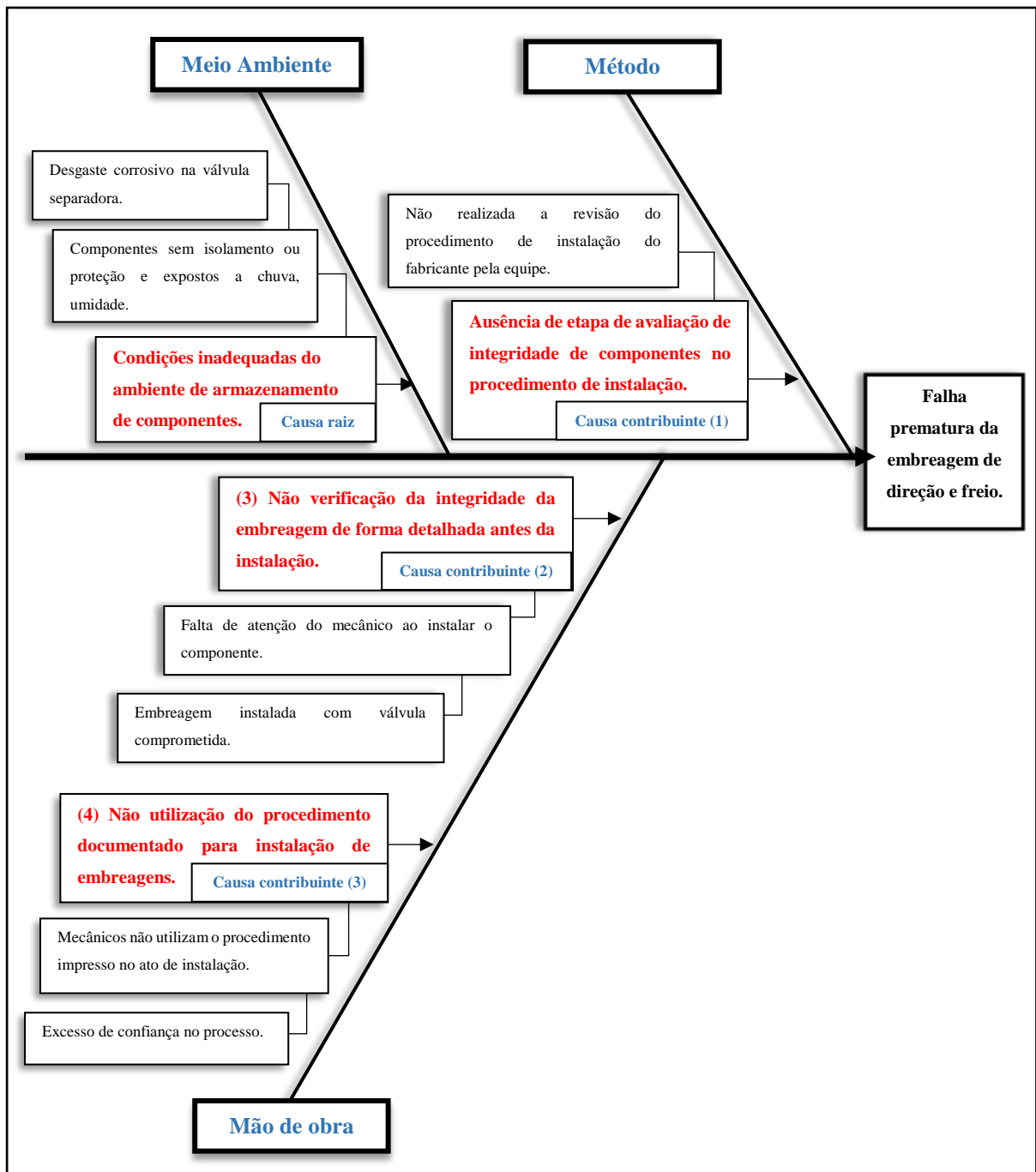
Fonte: Autoria própria (2021).

Ao fim da utilização do método dos cinco porquês, tem-se como 5º porque e causa raiz da falha em questão, as condições irregulares de armazenamento da embreagem no período que antecedeu sua instalação no trator.

#### 4.1.2 Aplicação do método de Ishikawa

Embora, a causa raiz da falha já tenha sido identificada, outras causas contribuintes podem estar associadas a diferentes processos de forma a contribuir para a falha prematura da embreagem de direção e freio. Frente a isso, utilizou-se o diagrama de Ishikawa com o intuito de estabelecer a relatividade existente entre a falha e todas as possíveis causas contribuintes envolvidas no processo. A Figura 42 mostra as demais causas apontadas pelo método citado.

Figura 42. Diagrama de Ishikawa aplicado a falha da embreagem.



Embora o método de Ishikawa conte com 6 categorias de análise, Telles (2019) ressalta que não é obrigatório o uso de todas elas, uma vez que a devida utilização destas variam de acordo com os eventos. Para a falha da embreagem de direção e freio, a análise a partir do método apontou 4 causas nas categorias de meio ambiente, mão de obra e método conforme mostrado na Figura 42.

Na categoria meio ambiente apontou-se as condições inadequadas de armazenamento da embreagem associada as características clima quente e úmido da mesorregião do sudeste paraense região no qual a empresa mineradora se localiza, sendo esta a causa raiz anteriormente apontada pelo método dos 5 porquês. A válvula oxidada em decorrência do armazenamento inadequado pode ser dada como a causa física do evento.

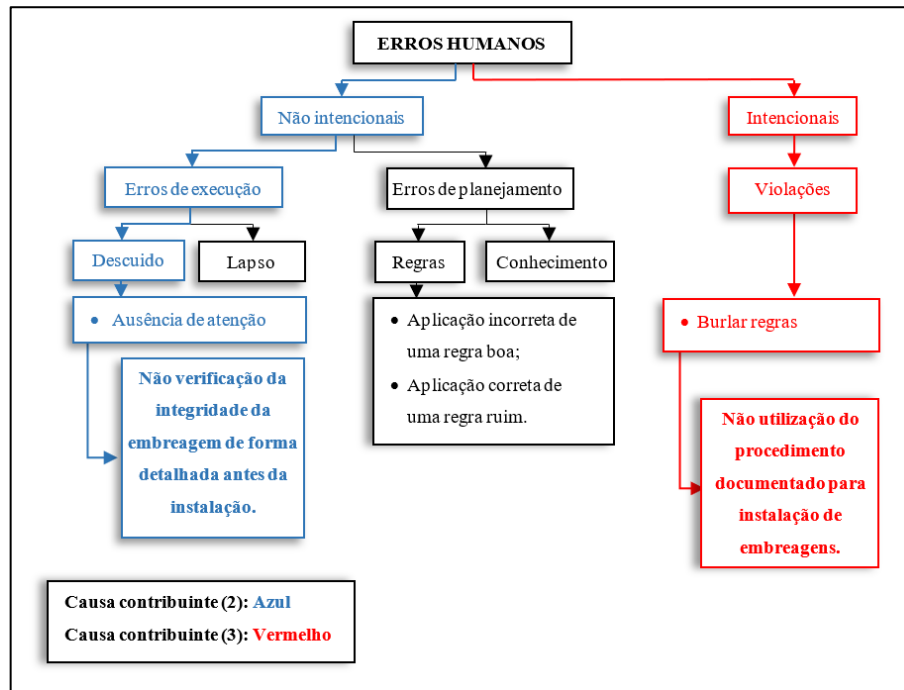
Na categoria método, a ausência de uma etapa de avaliação de integridade de componentes no procedimento de instalação foi identificada como uma causa contribuinte (2) para a falha da embreagem. Tal causa está relacionada a uma questão organizacional, uma vez que, trata-se de uma deficiência de execução nas estratégias que conduzem a manutenção a resultados positivos.

Como a embreagem estava sendo mantida em armazenamento inadequado, antes da instalação, a válvula separadora já estava apresentando sinais de oxidação, o que poderia ter sido observado pelos mecânicos no ato da instalação da embreagem no ativo. Dessa forma, a instalação teria sido interrompida devido a não conformidade do componente e essa ação evitaria o desenvolvimento do desgaste corrosivo na válvula separadora, o que indica outra causa contribuinte (2) associada, dessa vez, a categoria de mão de obra.

Ainda na categoria de mão de obra, temos outra causa contribuinte (3) descrita pela ausência de utilização de procedimento operacional disponível para auxiliar a instalação de embreagens nos tratores de esteiras pelos responsáveis pela atividade. Tal atitude está relacionada ao excesso de confiança desses profissionais no processo, uma vez que realizam atividades do tipo com uma certa frequência.

Por conseguinte, com base na metodologia de Telles (2019), foi feito um diagrama de erro humano com o objetivo de caracterizar o tipo de erro associado as causas contribuintes da categoria mão de obra identificadas a partir do método de Ishikawa. O diagrama pode ser observado na Figura 43:

Figura 43. Diagrama de erro humano aplicado a causas contribuintes atreladas a mão de obra.



Fonte: Autoria própria (2021).

Conforme mostrado na Figura 43, a causa contribuinte (2), sendo esta a não verificação da integridade da embreagem de forma detalhada antes da instalação, foi classificada como um erro humano de execução não intencional associado a descuido, a falta de atenção. Já a causa contribuinte (3) referente a não utilização do procedimento documentado para instalação de embreagens foi classificada como erro humano de violação intencional associado a regras burladas, uma vez que o uso de literatura de instalação é obrigatório durante a execução da atividade.

#### 4.2 GERAÇÃO DO PLANO DE AÇÕES

Uma vez que foram identificadas as causas responsáveis por desencadear a falha da embreagem, é necessário que haja a geração de um plano de ações para que o evento corretivo não volte a ocorrer. Assim, um conjunto de ações foi estabelecido com o intuito de atuar de forma a corrigir a falha decorrente das causas contribuintes e principalmente da causa raiz da falha da embreagem de direção e freio do trator de esteiras. Através do método 5W1H estruturou-se a Tabela 5 com todas as ações definidas como resultado da aplicação da metodologia ACR para a falha prematura do componente abordado.

**Tabela 5. Plano de ações gerado para a falha da embreagem através da ferramenta 5W1H.**

Ação	1W	2W	3W	4W	5W	1H
	<b>What?</b> (O que será feito?)	<b>When?</b> (Quando será feito?)	<b>Where?</b> (Onde será feito?)	<b>Why?</b> (Por que será feito?)	<b>Who?</b> (Quem fará?)	<b>How?</b> (Como fará?)
1	Reestruturação do galpão de armazenamento de componentes.	01/02/2021	Galpão de armazenamento	Para evitar a danificação de componentes enquanto aguardam instalação.	Equipe de infraestrutura	Através da reforma ou mudança de localização do galpão de armazenamento de componentes.
2	Garantir boas práticas e condições adequadas de armazenamento de componentes.	28/02/2021	Galpão de armazenamento	Para garantir que os componentes sejam bem armazenados e não sofram desgastes.	Líder de infraestrutura / Controlador de componentes	Através de medidas de controle de armazenamento, como isolamento adequado.
3	Revisão do procedimento operacional de instalação de embreagens.	29/01/2021	Engenharia	Para garantir que o procedimento de instalação enfatiza pontos de atenção voltados para a integridade dos componentes.	Estagiário de manutenção	Inclusão de etapa obrigatória, no roteiro, referente a análise visual para avaliar as condições de componentes antes da instalação.
4	Garantir uso do procedimento operacional e verificação prévia das condições de componentes antes da instalação.	29/01/2021	Oficina	Para evitar que componentes sejam instalados em condições inadequadas e não íntegras.	Gerente de manutenção / Supervisor de execução manutenção	Através da comunicação com a equipe, ressaltando a importância e obrigatoriedade da utilização de roteiro de instalação.

Fonte: Autoria própria (2021).

Conforme mostrado na Tabela 5, quatro ações corretivas foram estabelecidas, todas elas devidamente detalhadas pela ferramenta 5W1H de forma a indicar o que, quando, onde, por que, quem e como será feita. A primeira ação foi voltada para a reestruturação do galpão de armazenamento de componentes de forma a evitar a danificação de componentes enquanto estes aguardam instalação. A segunda ação consistiu em garantir boas práticas e condições adequadas de armazenamento para estes componentes com o intuito de evitar o surgimento de novos desgastes nos mesmos. A terceira ação, por sua vez, foi voltada para a revisão do procedimento operacional de instalação de embreagens, de forma a garantir que o procedimento de instalação enfatiza pontos de atenção voltados para a integridade dos componentes. E por fim, a quarta ação visou garantir o uso do procedimento operacional e a verificação prévia das condições de componentes antes da instalação.

Dessa forma, com as ações definidas (1W) e devidamente associadas a um prazo (2W), local (3W) e justificativa de realização (4W), os profissionais definidos (5W) devem seguir os procedimentos descritos para como executar (1H) e cumprir as ações no intervalo definido. Cada ação será melhor detalhada nos tópicos seguintes junto a verificação de seu cumprimento e efetividade frente as causas identificadas no processo de análise.

#### 4.2.1 Restrução do galpão de armazenamento de componentes

Considerando as condições inadequadas do antigo galpão, o armazenamento de componentes foi realocado para uma nova instalação. Assim, para comportar componentes novos e reformados enquanto aguardam instalação nos ativos da empresa, foi selecionado um outro galpão junto a gerência de infraestrutura da organização.

O novo galpão foi reestruturado e adaptado para o recebimento e alojamento de componentes, tais como, as embreagens, comandos finais, transmissões, motores e etc. A Figura 44 mostra o novo local e logística de armazenamento de componentes após 6 meses de utilização.

**Figura 44. Novo galpão estabelecido para o armazenamento de componentes.**



Fonte: Aatoria própria (2021).

Conforme mostrado na Figura 44, o novo ambiente apresenta cobertura reforçada e entradas laterais para garantir a devida ventilação interna para os itens armazenados. Dessa forma, evita-se que a umidade gere danos superficiais nas peças e componentes. O piso do local foi devidamente nivelado para receber as prateleiras de aço inseridas no local para fins de organização e otimização da utilização do espaço disponível para o armazenamento. Além disso, a adequação do piso também foi necessária para garantir o bom fluxo de máquinas de pequeno porte, como empilhadeiras. O resultado de tudo isso refletiu na melhoria do armazenamento e organização dos componentes, protegidos agora, contra as intempéries do meio ambiente.

Vale ressaltar que, o novo local apresenta maior extensão para o armazenamento de componentes. Essa característica era utilizada como justificativa pelos responsáveis pelo antigo galpão para manter componentes na área externa, os mesmos alegavam que o antigo local não tinha espaço suficiente para armazenar todos os componentes.

#### **4.2.2 Garantir boas práticas e condições adequadas de armazenamento de componentes**

De acordo como definido inicialmente para a ação 2 na Tabela 5, a responsabilidade de sua execução engloba duas frentes gerencias da organização. A primeira sendo a gerência de infraestrutura, representada pela figura do responsável principal pelo galpão de armazenamento (líder de infraestrutura), e a segunda sendo a gerência de manutenção, por sua vez, representada pela figura do controlador de componentes.

Dessa forma, para garantir as boas práticas de armazenamento foi definido como função para o responsável principal do galpão, a atividade de inspeção diária das condições de armazenamento dos componentes de forma a garantir que estes estejam sempre bem acondicionados e não sejam submetidos a condições de danos ou desgastes.

Na organização, cada frota de equipamentos móveis, como a de tratores, conta um com um profissional responsável pelo controle dos componentes desta. Logo, dentre as suas funções, cabe a esses profissionais garantir que seus componentes estejam íntegros e sejam instalados em boas condições em seus respectivos ativos. Frente a isso, foi estabelecido que os controladores de componentes de cada frota devem realizar uma visita semanal ao galpão de armazenamento para realizar uma atividade de inspeção. Dessa forma, esses profissionais podem então verificar e identificar possíveis irregularidades associada a condição dos

componentes que estão sob sua responsabilidade, e assim, solicitar de forma imediata a correção da condição irregular.

Conforme definido para a ação 2 descrita na Tabela 5, foi realizado o devido isolamento dos componentes armazenados no galpão. A Figura 45 mostra alguns componentes como embreagens e motores devidamente isolados sob invólucro plástico.

**Figura 45. Medida de isolamento aplicada aos componentes armazenados no galpão.**






Fonte: Autoria própria (2021).

Dessa forma, os componentes ficaram protegidos de possíveis contatos com soluções corrosivas, sujeiras e condições ambientais inadequadas. Junto a isso, foi ressaltado que, obrigatoriamente, todos os componentes devem ser mantidos sempre na região interna do novo local de armazenamento.

#### **4.2.3 Revisão do procedimento operacional de instalação de embreagens**

Para solucionar a falha atrelada ao erro de método apontada pelo diagrama de Ishikawa mostrado na Figura 42, foi realizada a revisão do procedimento operacional (PRO) de instalação de embreagens em tratores de esteiras. A atualização contou, inicialmente, com a inserção de um novo ponto de atenção do cabeçalho do procedimento operacional de instalação da embreagem mostrado na Figura 46. O tópico inserido refere-se a análise obrigatória da integridade do componente antes da sua instalação.

Figura 46. Cabeçalho do procedimento operacional de instalação de embreagem revisado.

<b>PRO - Instalação de embreagem de direção e freio</b>			Approve date: 29/01/2021
<b>Personal protective equipment:</b>	<b>Standard</b> ⓘ	<b>Objetivo-Alcance-Resultado:</b> 👁	<b>Pontos de atenção:</b>
 Usar luva de vaqueta anti impacto	Instalar embreagem de direção e freio do trator de esteiras CAT D11.		*Bloquear o equipamento conforme INS 18.010;
 Usar óculos de proteção 3M			*Isolar a área;
 Usar capacete de proteção 3M			*Inspeccionar as ferramentas;
			*Analisar, obrigatoriamente, a integridade do componente antes da instalação.

Fonte: Autoria própria (2021).

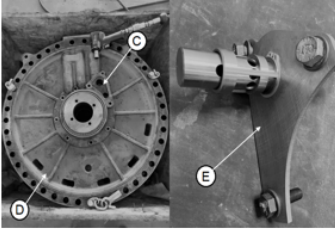
A adição desse ponto de atenção logo na aba inicial do procedimento foi realizada com intuito de informar ao responsável pela instalação que a avaliação do estado do componente deve ser realizada de forma imediata. Além disso, conforme mostrado na Figura 47, definiu-se como etapa 1, no procedimento operacional, a realização da análise visual do componente.

Figura 47. Etapa de análise visual inclusa no procedimento operacional de instalação de embreagens.

**Instale a embreagem**

**Mecânico / Técnico Mecânico**

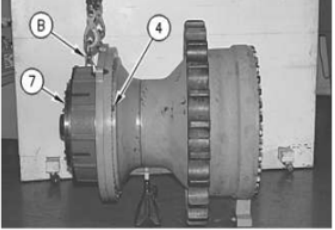
ETAPA 1. Faça a análise visual do componente



1. Avalie a integridade da embreagem. Verifique, na carcaça (D), se há irregularidades como regiões amassadas e desgastes superficiais.
2. Avalie a integridade da válvula separadora (E) assim como seu local de instalação (C) quanto a danos e desgastes.

⚠ Se alguma anomalia, desgaste ou irregularidade for indetificada no componente durante a etapa de análise visual, interrompa a instalação e contate o supervisor de execução da frota responsável.

ETAPA 2. Instale a embreagem de direção e freio



⚠ Realize o bloqueio do equipamento - Bloqueio LOTO.

1. Instale o anel retentor em O no freio e na embreagem de direção (7) .
2. Prenda um dispositivo de levantamento adequado e o Ferramental (B) no freio e na embreagem de direção (7).
3. Coloque o freio e a embreagem de direção (7) no lugar no comando final. O freio e a embreagem de direção (7) pesam aproximadamente 454 kg (1.001 lb).

Fonte: Autoria própria (2021).

Na etapa 1, o operário responsável pela atividade deverá observar de forma atenciosa, vestígios de danos ou desgastes superficiais que podem estar presentes no componente, com

ênfase na verificação da integridade da válvula separadora, uma vez que esta é o único item da embreagem que possui parte externa em relação a carcaça do componente.

Ainda de acordo com a Figura 47, na etapa 1, foi inclusa uma observação sinalizada em vermelho referente a como o operador deve agir em caso da identificação de danos ou desgastes no componente. Ação em questão se trata da interrupção da atividade de instalação e a devida comunicação ao supervisor de execução responsável pela do ativo que estará recebendo o novo componente. Com isso, busca-se vetar a instalação de componentes comprometidos, evitando assim, que danos ou desgastes decorrentes de suas condições de mantimento, no período anterior a sua instalação, se desenvolvam após aplicação em algum equipamento e, conseqüentemente, gerem uma nova falha funcional.

Vale ressaltar a importância da atualização de procedimentos operacionais, uma vez que, a não realização desta pode induzir o erro humano durante as atividades de manutenção. Dessa forma, para evitar equívocos atrelados ao uso de documentos desatualizados, é fundamental manter as revisões periódicas dos procedimentos operacionais utilizados em atividades de manutenção, como a instalação e remoção de componentes. Caso contrário, os profissionais de execução poderão realizar atividades que, no final das contas, podem não resolver um problema ou até mesmo gerar futuras falhas em um equipamento.

#### **4.2.4 Garantir uso do procedimento operacional e verificação prévia das condições de componentes antes da instalação**

Sob responsabilidade da gerência geral de manutenção de equipamentos móveis, foram realizadas reuniões com os operários de todos os turnos de trabalho do setor de manutenção. Nas ocasiões, a falha da embreagem de direção e freio assim como suas causas foram devidamente apresentadas para todos, de forma que estes ficassem, a partir de então, cientes do modo de falha associado as condições de armazenamento de componentes. A Figura 48 mostra reunião da gerência com a equipe de manutenção no box da oficina de equipamentos móveis.

**Figura 48. Reunião da gerência com a equipe de manutenção no box da oficina de equipamentos móveis.**



Fonte: Autoria própria (2021).

Na ocasião, foi ressaltada a obrigatoriedade da utilização de documentos com instruções operacionais durante a instalação de componentes. Tal obrigação já era regra dentro da organização, porém não estava sendo seguida por todos os colaboradores, dessa forma, merecendo caráter de atenção. Frente a isso, foi orientado aos supervisores de execução das frotas (tratores, escavadeiras, mineradores de superfície, etc.), a intensificação na inspeção diária realizada para verificar se todos os operários estão utilizando o documento durante a instalação de componentes na oficina do setor de manutenção.

Os supervisores de execução são responsáveis pela programação de atividades das suas respectivas frotas, cabendo a eles estarem presente nas oficinas no horário programado para a realização da atividade de manutenção. Assim, cabe a estes fiscalizar se os mecânicos estão executando os procedimentos corretos conforme estabelece as regras da organização.

Com a medida, buscou-se reforçar a obrigatoriedade do uso rotineiro do procedimento operacional pelos operários da organização, ressaltando sua importância e os prejuízos que a ausência da sua utilização pode ocasionar, tais como execuções fora de sequência lógica das etapas do procedimento e futuras falhas.

Além disso, sabe-se que procedimentos operacionais passam por mudanças periódicas para melhor descrever uma atividade com base nas particularidades de um processo ou uma organização. Logo, a constante realização de procedimentos de manutenção respaldadas em um documento composto pelas etapas estabelecidas para o mesmo, evita, dessa forma, a ocorrência de erros humanos, como o descuido e a falta de atenção durante a realização de atividades como a instalação de uma embreagem em um equipamento, e com isso, promove a redução de eventos corretivos associados a falhas de mão de obra.

Por fim, vale ressaltar que as ações definidas nesse trabalho apresentaram abrangência para os demais equipamentos da organização, não só para a frota de tratores de esteiras. Dessa forma, após a aplicação das ações corretivas a falha apresentado, não houveram ocorrência de novas falhas associadas a condições de armazenamento, reduzindo assim, o impacto das manutenções corretivas não planejadas no processo operacional da organização.

## 5 CONCLUSÃO

Esse estudo possibilitou entender a necessidade da utilização de ferramentas de análise no meio industrial, uma vez que essas organizações atuam com base em uma operação contínua e paradas corretivas se traduzem em prejuízos financeiros para as mesmas. Logo, é imprescindível para a manutenção de equipamentos móveis, a aplicação de uma metodologia estruturada voltada para o diagnóstico e tratamento de falhas operacionais.

Para se chegar em resultados satisfatórios para a análise, foi necessário realizar a coleta de informações relacionados ao evento corretivo e a embreagem. Após a identificação do gatilho para a realização da análise, sendo este a falha prematura do componente, traçaram-se objetivos buscando soluções e ações eficientes para o procedimento analítico, de forma que, se pudesse aplicar todas as etapas do método de Análise de Causa Raiz (ACR) para resolução da falha da embreagem de direção e freio.

Com base na utilização do método dos cinco porquês, foi possível identificar que as condições inadequadas de armazenamento da embreagem, no período que antecede sua instalação no trator, foram a causa raiz da sua falha. Além disso, através do diagrama de Ishikawa, identificou-se outras causas contribuintes associadas a mão de obra, como a falta de atenção durante a execução da atividade de instalação da embreagem, e aos métodos utilizados pela organização, como a existência de procedimentos operacionais desatualizados.

Os resultados obtidos permitiram controlar a falha por meio de mudanças na forma e local de armazenamento de componentes como a embreagem, junto a revisão de procedimentos operacionais e ações voltadas a mão de obra e etapas de execução de atividades como a instalação da embreagem de direção e freio, ressaltando a importância e obrigatoriedade da utilização do procedimento em passos durante a realização destas atividades.

Em suma, a metodologia ACR mostrou-se uma ferramenta simples e com passos bem estruturados a serem seguidos para o desempenho de uma boa análise de falhas. Os especialistas envolvidos no processo de investigação contribuíram de forma significativa para andamento da mesma. Por fim, com esse trabalho, espera-se criar um histórico de tratativas de falha, visto a grande importância da sua devida utilização nos demais ramos da indústria para a melhoria de processos, tornando-os assim, mais confiáveis e produtivos.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 31010: Gestão de riscos: Técnicas para o processo de avaliação de riscos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

AFONSO, L. O A. **Equipamentos mecânicos: análise de falhas e solução de problemas**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2006.

AGUIAR M. C. **Análise de Causa Raiz: levantamento dos métodos e exemplificação**. 2014. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC, Rio de Janeiro.

AMMERMAN, M. **The Root Cause Analysis Handbook: a simplified approach to identifying, correcting, and reporting workplace errors**. Portland: Productivity, 1998.

ANDRADE L. **Diagrama de Ishikawa: o que é e como fazer**. 2017. Siteware. Disponível em <<https://www.siteware.com.br/blog/metodologias/diagrama-de-ishikawa/>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

ARCHARD, J. F. **Wear Theory and Mechanisms**. In: PETERSON, M. B.; WINER, W. O. **Wear Control Handbook**. New York: ASME, 1980. Cap. 4, p. 35-80.

BRANCO FILHO, G. **Indicadores e Índices de Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna LTDA, 2006.

CARVALHO, F. L. **Estudo do desgaste de ferramentas de conformação de tubos nitretadas a plasma**. 2019. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.

CATERPILLAR. **Applied Failure Analysis: Principles of Wear**. Service Training Meeting Guide 015. Illinois, EUA: Deerfield, 2000.

COSTA, M. A. **Gestão estratégica da Manutenção: uma oportunidade para melhorar o resultado operacional**. 2013. Tese (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

COUTINHO, T. **Entenda o que é e como construir um diagrama de Ishikawa para identificar problemas**. Minas Gerais, out. 2020. Voitto – Escola de Negócios. Disponível em <<https://www.voitto.com.br/blog/artigo/diagrama-de-ishikawa>> Acesso em: 29 ago. 2021.

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 50320: Wear, Systems Analysis of Wear Processes, Classification of The Field of Wear**. English, International Classification for Standards, Alemannic, 8p, 1979.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. **Confiabilidade e manutenção industrial, 1. ed.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 341p, 2003.

GRUBB, JOHN. **Materials selection considerations for corrosive wear situations**. 2011. Scribd. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/261947332/Materials-Selection-Considerations-for-Corrosive-Wear-Situations>> Acesso em: 06 jul. 2021.

KARDEC, A.; NASCIF J. **Manutenção: função estratégica, 3.ed.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 384 p., 2009.

KOPELIOVICH, D. **Mechanisms of wear**. Substech (Substances & Technologies). 2020. Substech – Substances e Techonogies. Disponível em: <[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms\\_of\\_wear](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear)> Acesso em: 05 jul. 2021.

MARCORIN. W. R; LIMA, C. R. C. **Análise dos Custos de Manutenção e de Não-manutenção de Equipamentos Produtivos**. Revista De Ciência & Tecnologia, São Paulo. v. 11, n 22, p. 35-42, 2003.

NASCIF, J.; DORIGO, L.C. **Manutenção Orientada Para Resultados**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada, 4. ed.** Porto Alegre: Bookman, 2013.

PALADINI, E. P. et al. **Gestão da Qualidade: Teoria e Prática, 3a ed.** São Paulo: Editora Atlas, 2012.

PALLEROSI, C. A. **Confiabilidade, A Quarta Dimensão da Qualidade – Manutenibilidade e Disponibilidade, vol. 5.** São Paulo: ReliaSoft Brasil, 2007.

POPOV, B. N. **Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems.** Elsevier, 2015.

RADI et al. **Tribologia, conceitos e aplicações.** 13º ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA – XIII ENCITA, 2007, São José dos Campos. **Anais.** São José dos Campos, São Paulo: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007.

RAMANATHAN, L.V. **Corrosão e seu controle.** São Paulo: Hemus, 1988, 344p.

RODRIGUES, M. V. **Ações para a Qualidade, 3 ed.** Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2010.

ROONEY, J.J.; HEUVEL, L.N.V. **Root Cause Analysis for Beginners.** Quality Progress, 2004, 45-53.

SHOOK, J. **Gerenciando para o aprendizado: usando o processo de gestão A3 para resolver problemas, promover alinhamento, orientar e liderar.** São Paulo: Lean Institute Brasil, 2008.

SIQUEIRA, Y. P. D. S. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implantação. 1ª ed.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR, A.W. **Engineering Tribology, Tribology Series 24.** New York, U.S.: 3. ed. Elsevier 2005. 801 p.

STOETERAU, R. L.; LEAL, L. D. C. **Tribologia.** 2004. 179 p. Docsite. Disponível em: <<https://www.docsite.com/pt/estudo-do-atrito/4774857/>>. Acesso em: 06 jul. 2021.

TELLES, J. **Bíblia do RCM: o guia completo e definitivo da manutenção centrada na confiabilidade na era da indústria 4.0.** Brasília: ENGETELES Editora, 2019.

**TERNER, G.L.K. Avaliação da aplicação dos métodos de análise e solução de problemas em uma empresa metal-mecânica.** Porto Alegre, 2008. 33-55p. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

**TOAZZA, G.F.; SELLITO, M. A. Estratégia de Manutenção Preditiva no Departamento Gráfico de uma Empresa do Ramo Fumageiro.** REVISTA PRODUÇÃO ONLINE v. 15, n. 3, 2015.

**VILLÁBON, L; SINATORA. A. Construção e Instrumentação de Abrasômetro do Tipo Roda de Borracha Para o Estudo do Comportamento, Tribológico de Aços.** REVISTA DA ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES, v. 13, p. 1-11. Lisboa, 2006.

**WEISS, A.E. Key business solutions: essential problem-solving tools and techniques that every manager needs to know.** Grã-Bretanha: Pearson Education Limited, 2011.

APÊNDICE A – Valores de medições para os discos e placas dos conjuntos de direção e freio da embreagem após a falha.

Conjunto	Item	Espessura (medida) em mm	Espessura total (medida) em mm
Direção	Disco 1	4,74	75,25
	Disco 2	4,72	
	Disco 3	4,72	
	Disco 4	4,68	
	Disco 5	4,64	
	Disco 6	4,65	
	Disco 7	4,67	
	Disco 8	4,65	
	Disco 9	4,68	
	Disco 10	4,71	
	Placa 1	3,17	
	Placa 2	3,17	
	Placa 3	3,14	
	Placa 4	3,15	
	Placa 5	3,16	
	Placa 6	3,15	
	Placa 7	3,14	
	Placa 8	3,15	
	Placa 9	3,16	
Freio	Disco 1	5,51	70,05
	Disco 2	4,92	
	Disco 3	4,15	
	Disco 4	3,76	
	Disco 5	4,18	
	Disco 6	3,79	
	Disco 7	4,05	
	Placa 1	5,95	
	Placa 2	5,71	
	Placa 3	5,58	
	Placa 4	5,63	
	Placa 5	5,45	
	Placa 6	5,67	
	Placa 7	5,7	

ANEXO A – Especificações do fabricante para a espessura dos itens dos conjuntos de direção e freio da embreagem.

Especificações dos conjuntos de direção e freio e da embreagem			
Conjunto	Qtd.	Peça	Descrição das Especificações
Direção	A espessura de dez discos de fricção novos e de nove placas novas é de $75,575 \pm 2,675$ mm ( $2,9754 \pm 0,1053$ pol).		
	10	Disco de Fricção	A espessura de um disco de fricção novo é de $4,70 \pm 0,20$ mm ( $0,185 \pm 0,008$ pol).
	9	Placa Separadora	A espessura de uma nova chapa é de $3,175 \pm 0,075$ mm ( $0,1250 \pm 0,0030$ pol).
Freio	A espessura de sete discos de fricção novos e sete placas separadoras novas é de $80,920 \pm 1,085$ mm ( $3,1858 \pm 0,0427$ pol).		
	7	Disco de Fricção	A espessura de um disco de fricção novo é de $5,56 \pm 0,08$ mm ( $0,219 \pm 0,003$ pol).
	7	Placa Separadora	A espessura de uma placa separadora nova é de $6 \pm 0,075$ mm ( $0,2362 \pm 0,0030$ pol).