

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
ENGENHARIA FERROVIÁRIA E METROVIÁRIA

FELIPE NARDELLI

ANÁLISE DE MODO DE FALHAS DE VÁLVULAS DE CONTROLE DO SISTEMA
DE FREIO PNEUMÁTICO DE UM VAGÃO DE CARGA

Joinville

2023

FELIPE NARDELLI

ANÁLISE DE MODO DE FALHAS DE VÁLVULAS DE CONTROLE DO SISTEMA DE
FREIO PNEUMÁTICO DE UM VAGÃO DE CARGA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Ferroviária e Metroviária da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Ferroviária e Metroviário.

Orientador: Dr. Yesid Ernesto Asaff
Mendoza

Joinville

2023

FELIPE NARDELLI

ANÁLISE DE MODO DE FALHAS DE VÁLVULAS DE CONTROLE DE UM
SISTEMA DE FREIO PNEUMÁTICO DE UM VAGÃO DE CARGA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Ferroviária e Metroviária da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Ferroviário e Metroviário.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Dr. Yesid Ernest Asaff Mendoza
Orientador/Presidente

Dr Luís Fernando Peres Calil
Membro

Dr Régis Kovacs Scalice
Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a toda minha família e esposa pelo apoio e incentivo desde quando a jornada a este curso de Engenharia Ferroviária se iniciou. Sempre me apoiaram e nunca desistiram do meu sonho, que também era o deles. Obrigado por tudo.

A Deus, pela minha vida, e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos encontrados durante o curso.

Agradeço imensamente ao trabalho e compreensão de todos os especialistas da RUMO Logística, em especial ao Felipe Gonçalves e João Zanfelici, agradeço também pelo suporte dado durante todo o processo. Além de todo trabalho envolvido, isso me gerou contatos e amigos por quem tenho grande admiração.

Agradeço também ao meu orientador Yesid Asaff, também coordenador do curso, que me orientou e me preparou para que eu pudesse desenvolver um trabalho de excelência e trazer novas formas de beneficiar o setor ferroviário.

Agradeço aos amigos, que ao longo dessa jornada, me ensinaram muito os valores pelos quais hoje prezo muito.

RESUMO

O sistema de freio de um vagão de carga deve estar sempre em perfeitas condições operacionais. Ao acionar ou desativar o freio, é essencial que não ocorram falhas ou problemas adicionais. Sua principal função é controlar a velocidade do trem e, por isso, durante cada processo de manutenção, todo o sistema deve ser ajustado para evitar qualquer vazamento de ar pressurizado na válvula de controle. No Brasil, ainda há dificuldades na aplicação de técnicas de manutenção, mas a Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA) pode ajudar a identificar e avaliar possíveis padrões de falha, suas causas e os efeitos no desempenho do sistema. Ao identificar antecipadamente essas falhas, é possível evitar situações de falha catastrófica que comprometam a capacidade de parada do vagão e reduzir o risco de acidentes. Além disso, a FMEA pode reduzir os custos de manutenção e até mesmo prever falhas no sistema, evitando a substituição desnecessária de componentes. Este trabalho apresenta uma análise dos modos de falha das válvulas de controle, que são componentes críticos do sistema de freio pneumático de um vagão de carga. Foi realizada uma análise de dados técnicos relacionados aos modos de falha da válvula de controle, com base no conhecimento especializado de profissionais experientes no sistema de freio de vagões de carga. A literatura ferroviária foi consultada para compreender o funcionamento do sistema de freio de vagões de carga e suas principais características, identificando os componentes considerados mais críticos, incluindo a válvula de controle. Para desenvolver o modelo de análise de modo de falha da válvula de controle, utilizou-se a técnica de Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA), que é uma abordagem de análise de confiabilidade. Através desse método, foram identificados os modos de falha mais comuns e suas consequências para o sistema de freio pneumático do vagão de carga. Por meio de entrevistas com especialistas do setor ferroviário e utilizando conhecimento prático e experiência de campo, discutiram-se medidas para mitigar a gravidade dos modos de falha. Para mapear as falhas da válvula de controle, foram obtidos dados técnicos por meio da Análise de Árvore de Falhas (FTA), fornecidos pela empresa do setor ferroviário.

Palavras-chave: FMEA. Válvula de Controle. Sistema de Freio. Técnicas de análise. Análise de modo de falhas.

ABSTRACT

The brake system of a freight car must always be in perfect operating condition. When activating or deactivating the brake, it is essential that they do not cause failures or additional problems. Its main function is to control the speed of the train and, therefore, during each maintenance process, the entire system must be adjusted to avoid any leakage of pressurized air in the control valve. In Brazil, there are still difficulties in the application of maintenance techniques, but the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) can help to identify and evaluate possible failure patterns, their causes and effects on system performance. By identifying these failures, it is possible to avoid catastrophic failure situations that compromise the ability to stop the wagon and reduce the risk of accidents. Furthermore, an FMEA can reduce maintenance costs and even predict system failures, even avoiding component replacement. This work presents an analysis of the failure modes of control valves, which are critical components of the pneumatic brake system of a freight car. An analysis of technical data related to control valve failure modes was carried out, based on the specialized knowledge of professionals experimenting with the freight car brake system. The protected literature was consulted to understand the operation of the freight car brake system and its main characteristics, identifying the components considered most critical, including the control valve. To develop the control valve failure mode analysis model, use the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) technique, which is a reliability analysis approach. Through this method, the most common failure modes and their consequences for the freight car's pneumatic brake system were identified. Through interviews with industry experts and practical knowledge and field experience, measures to mitigate the intensity of failure modes were discussed. To map the control valve failures, technical data were obtained through the Fault Tree Analysis (FTA), provided by the railway sector company.

Keywords: Failure mode analysis. Control valve. Pneumatic brake system. FMEA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema a Ar Direto	13
Figura 2 - Carregamento do Sistema de Freio	14
Figura 3 - Funcionamento da Válvula Tríplice	15
Figura 4 - Carregamento do Sistema de Freio	16
Figura 5 - Acionamento do Sistema de Freio	17
Figura 6 - Alívio do Sistema de Freio	17
Figura 7 - Evolução das válvulas de serviço ao longo dos anos	18
Figura 8 - Válvula ABD.....	20
Figura 9 - Válvula ABDX na posição de alívio	21
Figura 10 - Válvula ABDX na posição de aplicação	22
Figura 11 - Válvula ABDX internamente.....	22
Figura 12 – Vista explodida da Válvula ABDX.....	23
Figura 13 - Vista explodida da Válvula ABDX	23
Figura 14 - Estrutura de componentes de uma válvula de controle	24
Figura 15 - Válvula DB-60	27
Figura 16 - Partição da FMEA (Sistema, Projeto e Processo).....	29
Figura 17 - Mapeamento dos Modos de Falha de Conjunto.....	35
Figura 18 - Mapeamento dos Modos de Falha de Sistema.....	36
Figura 19 - Taxa de ocorrência de falhas em sistemas no período de 2020 a 2022 .	38
Figura 20 - Taxa de ocorrência de falhas no sistema de frenagem no período de 2020 a 2022	38
Figura 21 - Taxa de ocorrência de falhas nos sistemas nos períodos de 2020 a 2022	39
Figura 22 - Bocal F ao final da mangueira de conexão	45
Figura 23 - Diafragma Rompido	46
Figura 24 - Válvula de gaveta com risco	46
Figura 25 - Vazamento na junta da válvula	47
Figura 26 - Bujão Obstruído	47
Figura 27 - Diafragma com rasgo.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - FMEA da válvula de controle do sistema de freio pneumático de um vagão de carga	40
Tabela 2 - Tabela de ações recomendadas	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Análise funcional dos componentes da válvula de controle	25
Quadro 2 - Abordagem Funcional	30
Quadro 3 - Abordagem Estrutural	30
Quadro 4 - Tabela de Preenchimento da FMEA	30
Quadro 5 - Classificação do Índice de Severidade.....	33
Quadro 6 - Classificação do Índice de Ocorrência	33
Quadro 7 - Classificação do Índice de Detecção.....	34
Quadro 8 - Formulário FMEA	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	12
2 TIPOS DE SISTEMA DE FREIO E EVOLUÇÃO	13
2.1.1 Carregamento do Sistema	16
2.1.2 Acionamento do sistema	16
2.1.3 Alívio do sistema	17
2.1.4 Válvula de Serviço	18
2.1.5 Válvula AB.....	18
2.1.6 Válvula ABD	19
2.1.7 Válvula ABDX.....	20
2.1.8 Válvula DB-10.....	26
3 FMEA – ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E SEUS EFEITOS.....	28
3.1.1 Componente	30
3.1.2 Função.....	31
3.1.3 Falha Funcional	31
3.1.4 Modo de Falha	31
3.1.5 Efeito do Modo de Falha	31
3.1.6 Causa do Modo de Falha	32
3.1.7 Controles Atuais.....	32
3.1.8 Índice de Severidade (S).....	32
3.1.9 Índice de Ocorrência (O).....	32
3.1.10 Índice de Detecção (D).....	32
3.1.11 Número de Prioridade de Risco (NPR)	33
4 APLICAÇÃO DA FMEA NA VÁLVULA DE CONTROLE DO SISTEMA DE FREIO PNEUMÁTICO DE UM VAGÃO DE CARGA.....	35
4.1 Equipe Responsável pela Elaboração da FMEA.....	36
4.1.1 Coleta de dados e preparação da FMEA	37
4.1.2 Identificação dos modos de falha, efeitos e causas	39
4.1.3 Determinando o Índice NPR	39

4.1.4 Detalhamento dos modos de falha	45
4.1.5 Análise das ações recomendadas	48
4.1.6 Considerações Finais	49
5 CONCLUSÃO	51
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
REFERÊNCIAS.....	52
GLOSSÁRIO	54

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o transporte ferroviário é um modal pouco utilizado em termos de participação. Segundo dados da Confederação Nacional de Transportes (CNT), o modal rodoviário tem a maior participação do setor na matriz de transporte, representando 61,1% do total de cargas, seguido do ferroviário com 20,7% e pelo aquaviário com 13,6%. Considerando as vantagens energéticas do transporte ferroviário em relação ao rodoviário, pode-se concluir que, se as participações fossem inversamente proporcionais, haveria redução de custos na economia, e também traria menos impactos sociais (TORRACCA, 1996).

Com base nesse cenário, o movimento de mercadorias, especialmente em longos períodos de tempo, tende a representar a maior parcela dos custos fora da cadeia produtiva, fato que ressalta a preocupação com a eficiência do modal ferroviário. Quando uma empresa de transporte adota uma visão logística, elimina os desperdícios relacionados a melhores rotas e tempos de viagem menores (SILVEIRA, 2002).

Devido a isto, o mapeamento das possíveis falhas de um componente específico do sistema de freio como a válvula de controle, pode evitar uma parada indevida de uma composição de vagões, ocasionando uma interrupção na logística do transporte de carga fazendo com que esse ativo inoperante, traga diversos vieses de custo e manutenção.

O sistema de freio pneumático é peça vital para a segurança do trem, responsável por garantir que o veículo reduza a velocidade e pare em caso de emergência. A válvula de controle é um componente essencial desse sistema, controlando o fluxo de ar comprimido que aciona o sistema de freio. Quando a válvula de controle falha, o trem pode perder sua capacidade de frenagem, colocando em risco a segurança dos passageiros e de toda a composição envolvida na operação do trem (BORBA; BERGANTINI, 2011).

Tendo em vista a importância das válvulas de controle para a segurança dos sistemas de freio dos trens, é fundamental realizar uma análise do modo de falha para identificar os problemas associados a esse componente. Tal análise, pode indicar medidas de manutenção preventiva para reduzir o risco de falha das válvulas de controle, garantindo a segurança do sistema de freio dos vagões de carga (SANTOS, 2019).

Considerando isso, apresenta-se neste trabalho uma análise dos modos de falha da válvula de controle do sistema de freio a ar do vagão, identificando os modos de falha usuais, como vazamentos e contaminações externas, trazendo medidas de mitigação de risco. Acredita-se que isso evitará manutenções indevidas ou problemas adicionais. Além disso, a análise estrutural da FMEA será exclusivamente na porção de serviço da válvula, uma vez que essa porção é responsável pelas três funções da válvula, que é carregamento do sistema, aplicação e alívio dos freios.

Para realizar essa análise, serão utilizadas técnicas de análise de confiabilidade, como a Análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA – failure mode and effects analysis), que identifica os modos de falha da válvula de controle e suas consequências para o sistema de freio a ar do trem. O modo de falha é inerente a cada elemento, pois cada um possui sua própria característica específica, como função, ambiente de trabalho, materiais, acabamento e qualidade (SAKURADA, 2001).

Com base nessas técnicas, serão propostas medidas para melhorar o entendimento das falhas ocorridas no sistema de freios, cujo objetivo principal de minimizar os tipos de falhas que serão elucidadas e possivelmente reduzidas. Supõe-se que isso minimizará tais incidentes, com base nas técnicas de manutenção atuais.

Ao longo deste trabalho serão apresentados conceitos teóricos de sistemas de freio a ar para trens, bem como técnicas de análise de confiabilidade que serão utilizadas na análise do modo de falha de válvulas de controle. Além disso, serão descritos os procedimentos metodológicos aplicados para a realização da pesquisa, incluindo coleta de dados e análise dos resultados.

A conscientização da importância do mapeamento de falhas possíveis em um sistema de freio a ar dos vagões de carga e a redução dos riscos associados a possíveis avarias, assim como a análise do modo de falha das válvulas de controle é muito útil para empresas ferroviárias, fabricantes de componentes e organizações governamentais envolvidas na regulamentação e fiscalização desses sistemas.

1.1 OBJETIVOS

Analisar a porção de serviço da válvula de controle ABDX, afim de identificar todos os componentes da válvula e conseqüentemente identificar os modos de falha, baseando-se na análise funcional de cada componente.

1.1.1 Objetivo Geral

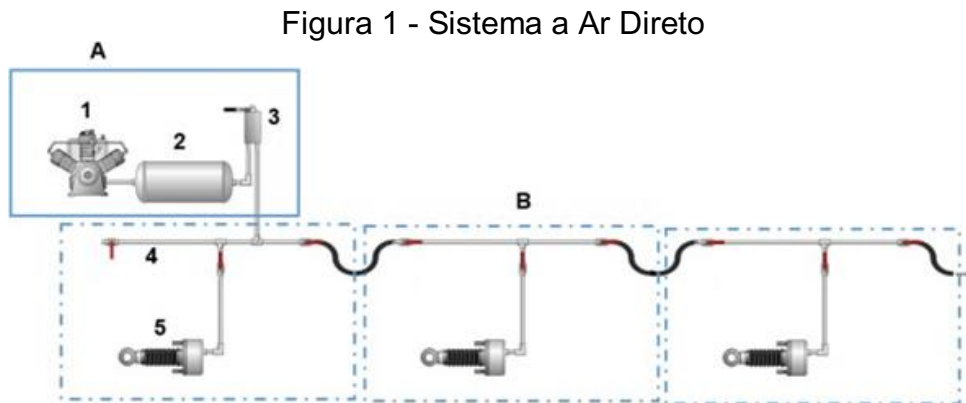
Analisar os modos de falhas que ocorrem na válvula de controle ABDX do sistema de freio pneumático de um vagão de carga na porção de serviço, visando identificar as principais causas das falhas, avaliar seu impacto e propor ações recomendadas para mitigar essas ocorrências.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Análise e organização dos dados obtidos, através de entrevistas com especialistas do setor ferroviário;
- b) Estudo bibliográfico sobre o sistema de freio pneumático de um vagão de carga, e comportamento da válvula de controle;
- c) Aplicar a Análise do modo de falhas e seus efeitos (FMEA), e identificar os principais modos de falha e recomendar uma ação:
 - i. Avaliação do modo de falha de cada componente inerente a sua função;
 - ii. Recomendações e propostas para tratamento de risco.
- d) Estruturar o desdobramento do produto, subdividindo os componentes da válvula de controle;
- e) Análise funcional de cada componente da válvula de controle, afim de identificar os modos de falha.

2 TIPOS DE SISTEMA DE FREIO E EVOLUÇÃO

Um dos primeiros sistemas de freio a ar comprimido para veículos ferroviários surgiu em 1869. Esse primeiro protótipo foi chamado de freio a ar direto, criado por George Westinghouse (Figura 1).



Fonte: Teodoro (2017, p. 12).

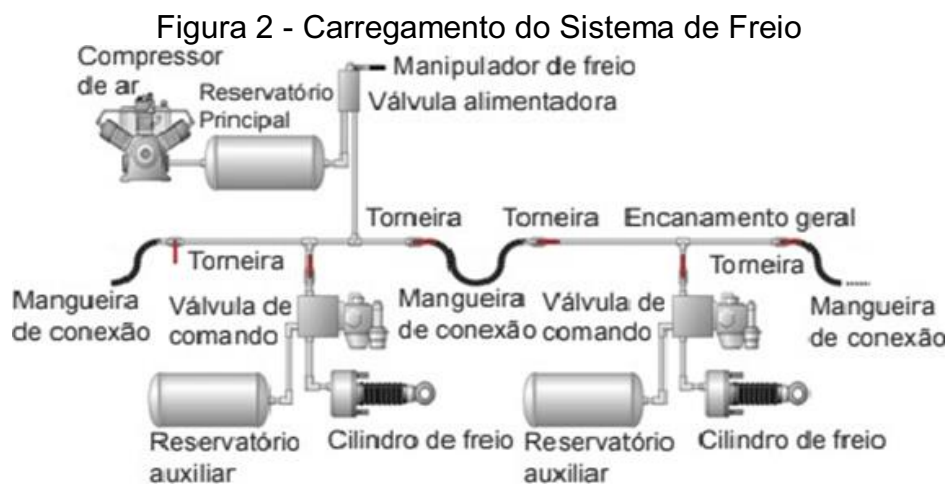
Quando os freios são aplicados, o ar comprimido que está em pressão dentro do reservatório principal é liberado pela válvula de controle para o encanamento geral da composição, que o joga pressurizado direto para os cilindros de freio. A haste do cilindro de freio começa a avançar e transfere a força para a timoneira de freio, que irá utilizá-la e transformá-la em uma força radial da sapata de freio, a qual irá tocar a roda do trem. Já o alívio do sistema de freio, ou do contato da sapata com a roda, é feito quando o ar comprimido do encanamento geral e do cilindro de freio é exaurido através da válvula de controle (BORBA; BERGANTINI, 2011).

No século XIX, esse tipo de freio era um marco para o avanço da tecnologia do sistema pneumático de freios e seu uso começou a se difundir rapidamente, devido a ser menor e menos pesado do que os que circulavam na Europa. No entanto, esse sistema continha muitas falhas e se limitava a pequenas composições, tendo em vista seu baixo rendimento. Com o passar dos anos, seu funcionamento causava rupturas de mangueiras e também do encanamento geral, a aplicação também era lenta e geralmente os últimos vagões davam grandes impactos e choques nos primeiros.

Em 1872, atendendo às novas expectativas de mercado, George Westinghouse desenvolveu um sistema de freio a ar automático. O termo automático

se referia ao fato de que a aplicação do freio era automática em todos os vagões, e em caso de vazamento ou problemas de conexão e perda de pressão, não era necessária intervenção. Nesse sistema, existe uma válvula tríplice que interpreta as diferenças de pressão do encanamento geral, carregando ou aliviando o sistema, conhecida como válvula de controle (BORBA; BERGANTINI, 2011).

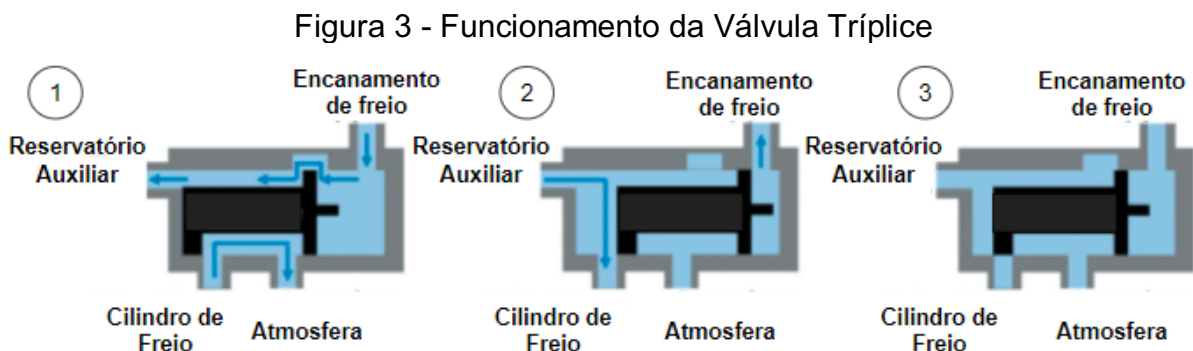
A Figura 2 mostra o sistema de um freio a ar automático.



Ao contrário do sistema anterior, na frenagem a ar automática, cada veículo tem um reservatório de armazenamento e uma válvula de controle, que a composição começa a se mover. A aplicação da frenagem ocorre removendo o ar (reduzindo a pressão) no encanamento geral, realizado pelo manipulador do freio, que faz com que a válvula de controle ajuste os orifícios internos, permitindo que o ar vá do reservatório auxiliar para o cilindro do freio. Nesse caso, a pressão gerada no cilindro do freio é proporcional à queda de pressão do encanamento geral (TEODORO, 2017).

Com os freios a ar automáticos, é possível aumentar a velocidade de propagação da onda de pressão, pois a quantidade de ar necessária para controlar o sistema é menor que a quantidade que deve ser transmitida ao sistema de freio a ar direto, como o anterior, isso interfere diretamente na redução dos problemas associados ao impacto entre os vagões. Além disso, o problema de ruptura do encanamento geral também foi resolvido, pois quando não há pressão no encanamento geral, a válvula de controle permite que o ar passe do reservatório auxiliar para o cilindro de freio, fazendo com que todos os veículos da composição freiem completamente (TEODORO, 2017)

A Figura 3 mostra o funcionamento da válvula tríplice. A primeira etapa é o carregamento, onde o ar do encanamento geral enche o reservatório auxiliar e mantém o ar pressurizado a 90 psi, na posição de carregamento. Na segunda etapa de frenagem, acontece a aplicação, onde o ar do reservatório auxiliar começa a direcionar-se para o cilindro de freio, enchendo o por completo, freando o vagão. E por último, temos a posição de pós-aplicação, onde o ar se mantém pressurizado dentro do cilindro de freio, mantendo os freios acionados. Após o processo de aplicação, a válvula de gaveta comuta, liberando o ar do cilindro direto para a atmosfera.



Fonte: Adaptado de Qing Wu et al. (2021, p. 4).

Todo sistema de frenagem de uma composição ferroviária é fundamental na frenagem do trem e também garante a segurança de operação de uma ferrovia. O sistema de freio de vagões é composto por muitos componentes de funções distintas e podem ser divididos em duas categorias: pneumático e mecânico (FERREIRA, 2019).

Segundo Ferreira (2019), o sistema de freio pressurizado de um veículo ferroviário, começa pelo encanamento geral que percorre todos os vagões até chegar ao fim da composição, conectados por mangueiras. O ar que alimenta esse encanamento é proveniente do compressor que está presente na locomotiva, sistema este carregado sempre a 90 PSI. O ar passa pelo coletor de pó onde serão filtrados dejetos ou impurezas de menor tamanho. Esse ar entra no encanamento, que leva diretamente à válvula de serviço.

A válvula de serviço inicia o carregamento do reservatório de ar, pois, para que o sistema funcione corretamente, ele deve estar completamente carregado. Quando o sistema de freio é acionado, ocorrerá uma queda de pressão do

encanamento geral, e a válvula comuta, direcionando o ar para o cilindro de freio. O cilindro é ativado e sua força será multiplicada pela alavanca de freio e pelos tirantes, até que as rodas sejam alcançadas (FERREIRA, 2019).

As válvulas de comando são conhecidas como válvula tríplice por desempenhar três funções principais: carregamento do sistema, aplicação do freio e alívio do freio. Por esse motivo, a válvula tem um papel fundamental no funcionamento correto do sistema de freio (BORBA; BERGANTINI, 2011).

2.1.1 Carregamento do Sistema

No carregamento do sistema, a válvula é responsável por direcionar o ar do reservatório principal para o encanamento geral e carrega o reservatório auxiliar até que as pressões se equiparem. Dessa forma, a composição fica apta a fazer o acionamento dos freios, como mostra a Figura 4.



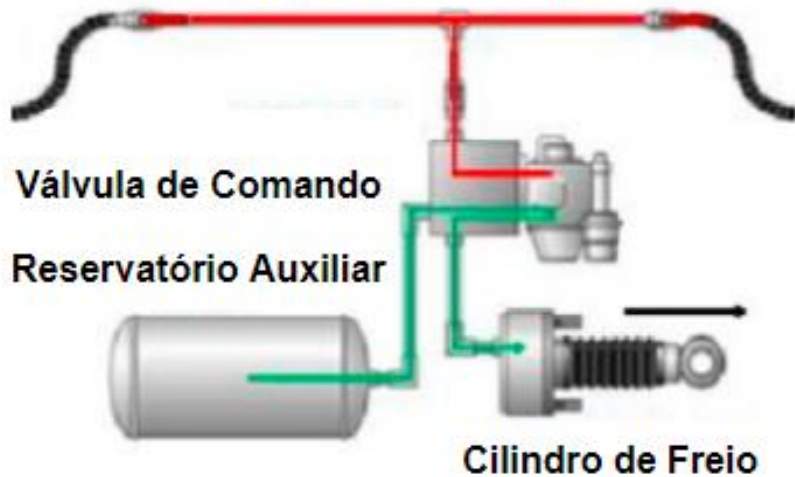
Fonte: Borba e Bergantini (2011, p. 7).

2.1.2 Acionamento do sistema

Já no acionamento dos freios é necessário diminuir a pressão do encanamento geral para que a válvula capte a diferença de pressão e passe a direcionar o ar do reservatório auxiliar direto aos cilindros de freio, como mostra a Figura 5. Pode acontecer neste instante também a posição de pós aplicação dos freios, onde a válvula graduadora e válvula de gaveta, impedem que o ar dos cilindros e do encanamento do cilindro seja direcionada para a atmosfera, mantendo

o cilindro pressurizado. Além disso, a válvula pode contar uma retentora de alívio, que auxilia na diminuição do tempo de volta do cilindro, facilitando um novo acionamento, isso principalmente em descidas de serra.

Figura 5 - Acionamento do Sistema de Freio
Encanamento Geral

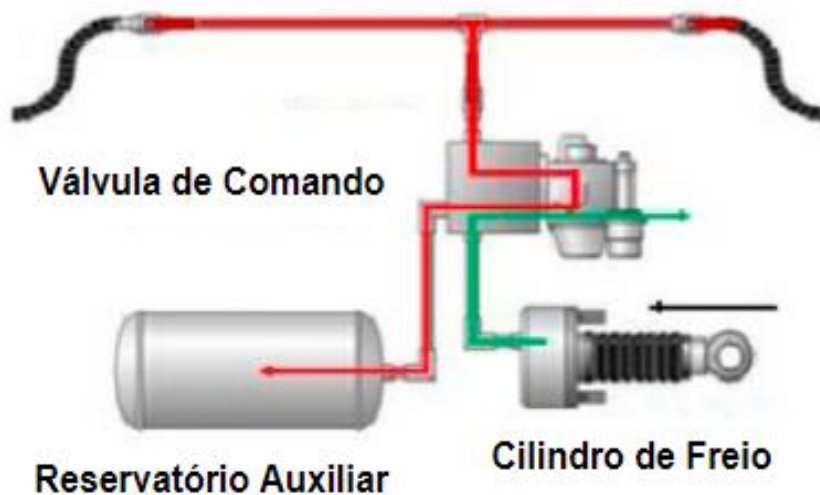


Fonte: Borba e Bergantini (2011, p. 7)

2.1.3 Alívio do sistema

Por fim, para o alívio dos freios é necessário aumentar a pressão do encanamento geral, fazendo com que o ar dentro do cilindro de freio seja despejado para a atmosfera, soltando a sapata de freio da roda, como visto na Figura 6.

Figura 6 - Alívio do Sistema de Freio
Encanamento Geral



Fonte: Borba e Bergantini (2011, p.8)

2.1.4 Válvula de Serviço

A válvula de comando possui duas porções: a porção de emergência e a de serviço. É mais comum existir apenas as válvulas com porção de serviço na malha sul do Brasil. O conjunto de válvulas do sistema de freio passou por diversas mudanças ao longo da história, como na Figura 7.

Figura 7 - Evolução das válvulas de serviço ao longo dos anos



Fonte: Julio (2012, p.21)

Como já mencionado, um conjunto de válvulas de controle é composto por válvula de serviço, válvula de emergência e suportes de tubulação. Responde a paradas de desaceleração e frenagem e uma parada de emergência quando os vagões são separados ou estão sob comando do maquinista (SANTOS, 2019).

2.1.5 Válvula AB

Todas as válvulas modernas são uma evolução constante de modelos mais antigos. A válvula AB serve como exemplo e base para as principais válvulas que são utilizadas hoje no setor ferroviário nacional (TEODORO, 2017).

Essa válvula controla os freios de serviço e os freios de emergência em vagões ferroviários, possui ventilação irrestrita no lado de serviço e uma câmara de ar de ação rápida que tem a mesma pressão do encanamento geral quando o sistema está carregado. Quando os freios estiverem sob carregamento, a válvula AB

estará na posição neutra. Quando uma aplicação de serviço é realizada, a pressão do encanamento geral começa a cair, causando um diferencial de pressão entre o encanamento geral e o pistão da válvula de controle, movendo-a para o lado de serviço. O ar começa a fluir do reservatório de ar auxiliar para os cilindros de freio.

A válvula AB libera a passagem de ar do cilindro freio para a atmosfera através de exaustão restrita. Isso resulta em uma rápida queda na pressão no encanamento geral e a válvula comuta para o lado de emergência, direcionando o ar dos reservatórios auxiliares e de emergência para os cilindros de freio (BENTLEY; JR, 2007).

A válvula AB é composta por duas partes: a de serviço (parte direita) e a de emergência (parte esquerda). O fluxo que pode passar por cada porção é controlado pela válvula de gaveta, que se move apenas quando há diferença de pressão entre suas porções (mesma pressão do encanamento geral). Essas partes são isoladas por um anel de vedação.

Essa mesma válvula de gaveta da parte de serviço, atua em todas as frenagens durante a viagem de um trem, enquanto a da parte de emergência atua apenas em operações em que é necessária a aplicação de emergência (RIBEIRO, 2017).

2.1.6 Válvula ABD

A válvula de controle ABD foi desenvolvida entre 1963 e 1964, para executar as mesmas operações da válvula AB com maior flexibilidade e confiabilidade e menor manutenção. Uma imagem de campo da válvula ABD é mostrada na Figura 8.

A válvula ABD é composta por duas partes, assim como a válvula AB: a de serviço (à direita) e a de emergência (à esquerda).

Com o avanço tecnológico, a válvula ABD possui pistões montados verticalmente, o que os torna menos suscetíveis às vibrações transmitidas pelas rodas dos vagões durante o transporte ferroviário. Além disso, os pistões são isolados por membranas, eliminando atrito e vazamentos causados por anéis.

Operacionalmente, a válvula ABD funciona de maneira semelhante à válvula AB. A diferença está no alívio, que é mais rápido em comparação com sua antecessora: o reservatório de emergência é conectado ao encanamento geral

durante as operações de alívio, aumentando a pressão do encanamento geral de forma mais rápida e permitindo uma propagação acelerada do sinal de alívio ao longo da composição. A economia de tempo proporcionada pelo uso da válvula ABD é perceptível em composições pequenas ou com baixo índice de utilização, mas se torna considerável em trens de carga com até 300 vagões e operação contínua.

Figura 8 - Válvula ABD



Fonte: Autor, 2023

Operacionalmente, a válvula ABD funciona de maneira semelhante à válvula AB. A diferença está no alívio, que é mais rápido em comparação com sua antecessora: o reservatório de emergência é conectado ao encanamento geral durante as operações de alívio, aumentando a pressão do encanamento geral de forma mais rápida e permitindo uma propagação acelerada do sinal de alívio ao longo da composição. A economia de tempo proporcionada pelo uso da válvula ABD é perceptível em composições pequenas ou com baixo índice de utilização, mas se torna considerável em trens de carga com até 300 vagões e operação contínua.

2.1.7 Válvula ABDX

O funcionamento e detalhes da válvula ABDX, podem ser vistos na Figura 10 à 14. A válvula ABDX incorpora avanços da válvula ABD e possui uma funcionalidade adicional: aplicação acelerada. Em qualquer aplicação, o encanamento geral da ABDX é conectado à atmosfera através de uma parte de emergência até que sua pressão se equilibre com a pressão do ar. O resultado é

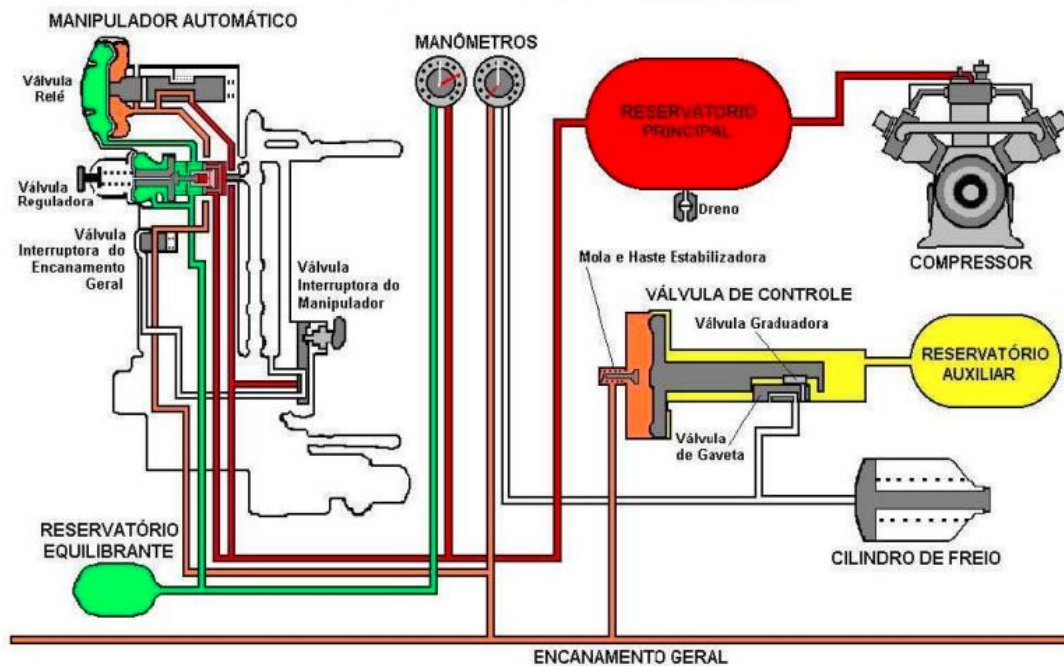
uma diminuição mais rápida da pressão no encanamento geral ao utilizar a válvula ABDX em comparação com suas versões anteriores. Essa nova funcionalidade, assim como o alívio acelerado da válvula ABD, é especialmente relevante ao lidar com longas composições que circulam com alta frequência (RIBEIRO, 2017).

Segundo Ribeiro (2017), durante as simulações com as válvulas ABDX, percebeu-se que, a pressão do encanamento geral de vagões com esse tipo de válvula, cai rapidamente em comparação com os outros modelos AB e ABD. Isso trouxe uma pressurização mais rápida do cilindro de freio, e conseqüentemente uma aplicação de freio em menos tempo.

A válvula ABDX possui uma funcionalidade que conecta o encanamento geral à atmosfera durante as aplicações, acelerando a propagação do sinal de aplicação ao longo da composição. Nas válvulas ABDX o reservatório de emergência é conectado ao encanamento geral para que o sinal de alívio seja propagado mais rapidamente (RIBEIRO, 2017).

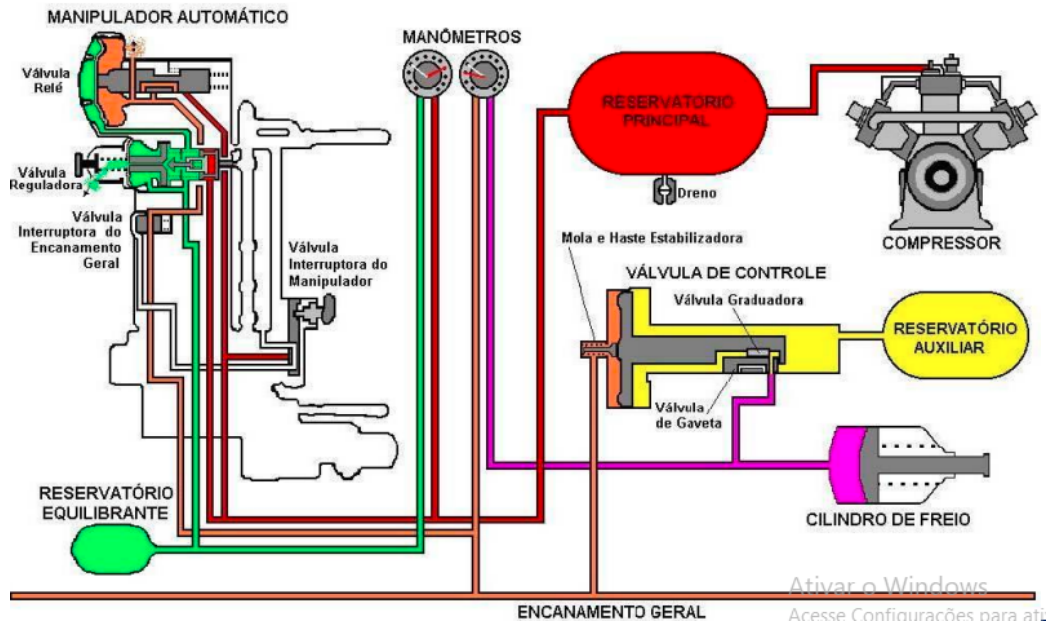
No momento da aplicação ou alívio dos freios, a válvula de gaveta muda de posição, conforme as Figuras 9 e 10, impedindo o fluxo de ar para os cilindros de freio no alívio, e liberando passagem de ar para os cilindros de freio na aplicação.

Figura 9 - Válvula ABDX na posição de alívio
POSIÇÃO DE ALÍVIO OU MARCHA



Fonte: Treinamento Sistema de Freio, RUMO

Figura 10 - Válvula ABDX na posição de aplicação
POSIÇÃO DE APLICAÇÃO OU SERVIÇO



Fonte: Treinamento Sistema de Freio, RUMO

Nesse caso, a válvula de gaveta é feita de uma liga metálica composta de latão e bronze, ou seja, é um material muito sensível, que necessita de cuidados.

Nas Figuras 11, 12 e 13, podemos identificar os componentes da válvula internamente e também entender um pouco melhor o funcionamento de cada um. Já a figura 14 apresenta uma estrutura de desdobramento da válvula de controle.

Figura 11 - Válvula ABDX internamente



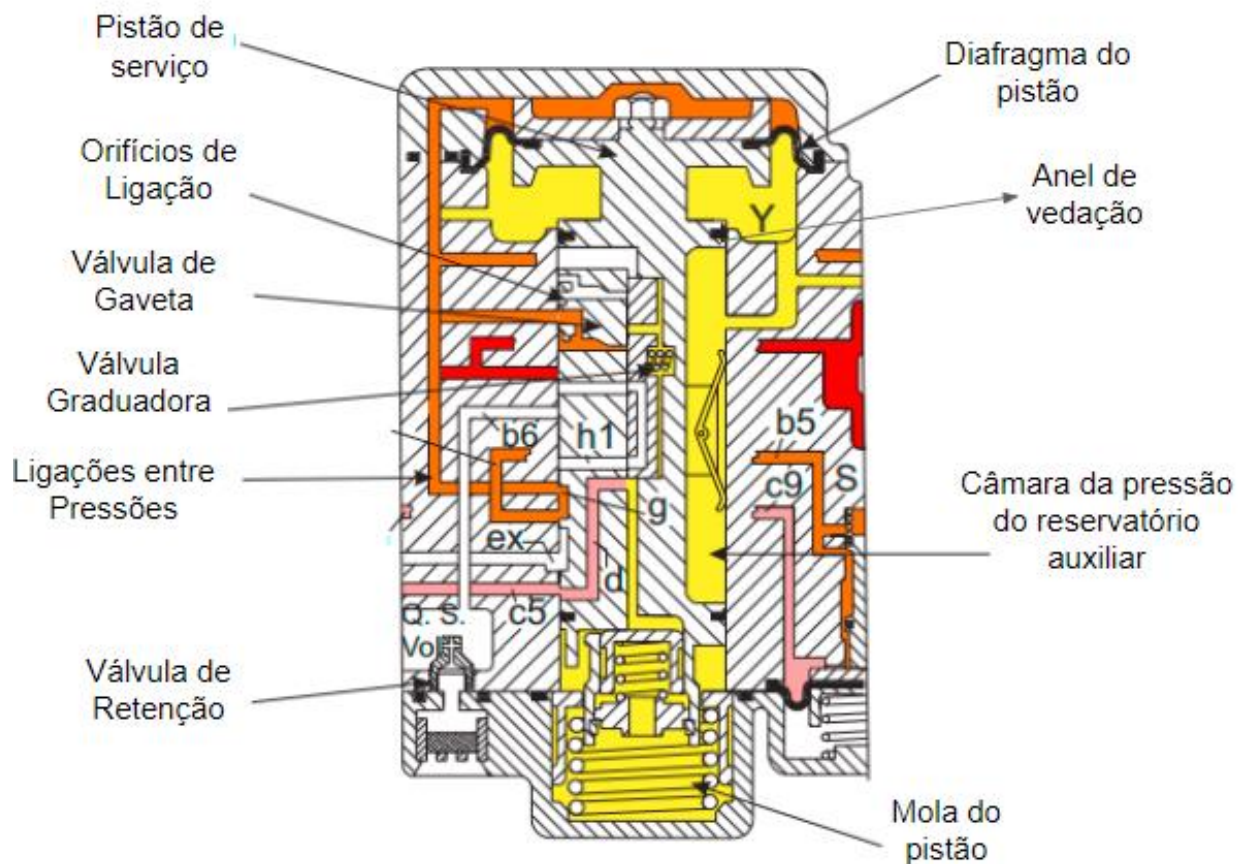
Fonte: Autor, 2023

Figura 12 – Vista explodida da Válvula ABDX



Fonte: Autor, 2023

Figura 13 - Vista explodida da Válvula ABDX

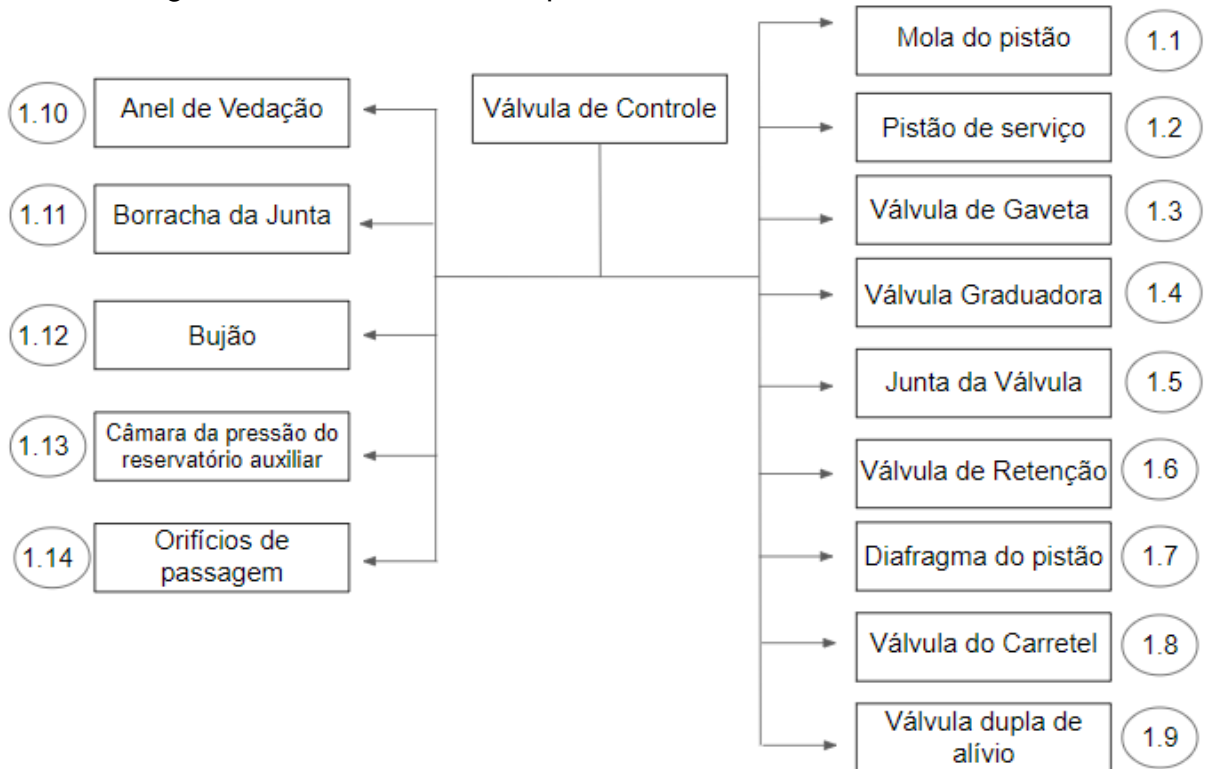


Fonte: Adaptado de Reading Air Brake Diagrams, 2001

A válvula ABDX desempenha um papel fundamental no controle preciso e

eficiente do sistema de freio. Para garantir a qualidade e o desempenho adequado de uma válvula de controle, é essencial ter uma estrutura de desdobramento de produto bem definida. Abaixo será apresentada uma estrutura de desdobramento de produto para a válvula de controle ABDX, destacando os principais componentes, conforme Figura 11 e 12. A estrutura de desdobramento de um produto é uma representação hierárquica do produto, onde o produto final é dividido em componentes menores e mais gerenciáveis. Essa divisão permite que o projeto seja abordado de forma sistemática, proporcionando uma visão clara e organizado de todas as partes que compõem o produto final. Isso ajuda a equipe de projeto a entender a relação entre as diferentes partes e a visualizar o produto como um todo. Alguns componentes dos subsistemas da válvula de controle, não foram identificados nas imagens, pois nas entrevistas diretas com especialistas do setor ferroviário, foi apontado que a taxa de ocorrência de falha desses componentes era irrelevante para a estrutura da tabela FMEA, uma vez que ocasionalmente eram tratados.

Figura 14 - Estrutura de componentes de uma válvula de controle



Fonte: Autor, 2023

Quadro 1 - Análise funcional dos componentes da válvula de controle

Componente	Descrição do Item	Análise Funcional
1.1	Mola Do Pistão	As molas são usadas para fornecer uma força resistente para compensar os efeitos do desequilíbrio de pressão de ar. As molas podem ser fixadas na extremidade de um pistão ou válvula de carretel e ser de vários tamanhos.
1.2	Pistão de Serviço	O pistão é o coração da válvula de controle. A porção de serviço tem um pistão, válvula graduadora e válvula de gaveta. Posiciona a válvula de gaveta para as posições de carregamento, aplicação e alívio dos freios. A forma do pistão tem relação direta com seu movimento, que permite que o ar flua ao redor da haste e permite o livre movimento do pistão.
1.3	Válvula de Gaveta	A válvula de gaveta é conectada ao pistão dentro da válvula de controle. Eles se movem dependendo do movimento do pistão, mas têm uma certa folga em seu movimento. A válvula de gaveta tem vários orifícios para permitir que o ar se mova de uma área para outra. A válvula de gaveta se alinhará com a sede dela. A sede da válvula de gaveta fica nivelada contra a válvula para garantir uma vedação adequada para cada abertura à medida que os orifícios se alinham. Para determinar onde termina a válvula de gaveta e começa a sede da válvula de gaveta, observe a hachura no diagrama. Quando a hachura muda, a válvula de gaveta termina.
1.4	Válvula Graduadora	Válvulas graduadoras são válvulas planas inseridas em uma abertura na haste do pistão. Eles também estão nivelados contra a válvula de gaveta. As válvulas graduadoras têm uma pequena abertura para permitir a passagem de ar. Quando o pistão se move, a válvula graduadora se move, isso faz com que as portas se alinhem na válvula de gaveta, permitindo que o ar flua, resultando em uma reação da válvula.
1.5	Junta da Válvula	A junta da válvula de controle tem a função de garantir uma vedação hermética entre as partes móveis da válvula, ela é essencial para evitar vazamentos indesejados de ar pressurizado.
1.6	Válvula de Retenção	As válvulas de retenção são usadas para interromper o fluxo de ar em uma direção, mas abrirão a uma pressão específica para permitir que o ar flua em outra direção. As válvulas de retenção normalmente usam uma mola presa para fornecer resistência em uma extremidade e uma vedação de borracha na outra extremidade.
1.7	Diafragma do Pistão	Os diafragmas são separadores de borracha presos ao centro do pistão e à borda externa da carcaça da válvula. Isso fornece uma vedação positiva em ambos os lados do pistão, resultando na formação de uma cavidade em ambos os lados do diafragma. A pressão exercida em um lado do diafragma faz com que o pistão se mova, resultando no movimento da válvula de gaveta e da válvula graduada. Os diafragmas são mostrados como dispositivos pretos sólidos em forma de "U" duplo.
1.8	Válvula do Carretel	Válvula de carretel são pistões que normalmente têm um eixo cilíndrico com saliências no eixo para prender os anéis de vedação. As válvulas de carretel normalmente têm um diafragma preso ao topo do carretel.

Componente	Descrição do Item	Análise Funcional
1.9	Válvula dupla de alívio	A função da válvula dupla de alívio em um vagão de carga é garantir a segurança e a integridade do vagão durante o transporte. Essa válvula é projetada para aliviar a pressão interna do vagão, quando a torneira angular antes da conexão com a válvula de controle é fechada. Esse fechamento, pode resultar num acúmulo de ar pressurizado nos cilindros, reservatório auxiliar e válvula de controle, a válvula dupla de alívio acionada manualmente, direciona todo o ar para a atmosfera.
1.10	Anel de Vedação	Válvulas de carretel são pistões que normalmente têm um eixo cilíndrico com saliências no eixo para prender os anéis de vedação. As válvulas de carretel normalmente têm um diafragma preso ao topo do carretel.
1.11	Borracha da Junta	A função principal da borracha da junta é criar uma vedação estanque entre as partes do corpo da válvula. Quando a válvula é aberta, a borracha da junta se comprime e se flexiona para permitir o fluxo de ar.
1.12	Bujão	Bujões são elementos que controlam os tempos de passagem de ar através de um orifício calibrado de diversos diâmetros. Eles têm também a função de isolar a passagem do ar quando não existe o orifício por um processo de fabricação e facilidade do processo de manutenção da válvula de controle. Podem também possuir um filtro de feltro ou tela para evitar a entrada de contaminantes na válvula, quando os mesmos tem a função de bujão de carregamento, pois são instalados logo na entrada, evitando a contaminação.
1.13	Câmara da pressão do reservatório auxiliar	Estas são áreas abertas usadas para manter um acúmulo de pressão de ar. Esse acúmulo de pressão pode ser através da válvula retentora para fornecer uma queda inicial rápida na pressão e uma liberação de pressão mais lenta. Podem ser áreas abertas sob ou acima do pistão usadas para fazer com que o pistão se mova.
1.14	Orifícios de Passagem	Os orifícios de passagem são aberturas no conjunto da válvula que permitem o movimento do ar quando alinham uma passagem e outra. Os orifícios abrirão ou fecharão dependendo do movimento do alinhamento da válvula.

Fonte: Autor, 2023

2.1.8 Válvula DB-10

Essa válvula é um dispositivo altamente avançado que utiliza um sistema de pistão com diafragmas e anéis de borracha do tipo "K". Sua tecnologia é considerada a mais moderna no mercado e possui uma função adicional chamada "W", incorporada diretamente em seu corpo.

Além disso, as funções oferecidas por essa válvula são equivalentes às aquelas pertencentes à família AB. Ela é projetada para ser instalada utilizando o mesmo suporte de encanamento, permitindo que seja transportada junto a vagões que possuam válvulas da família AB. Essa compatibilidade facilita a integração e o uso

eficiente da válvula em uma variedade de sistemas e configurações (BERGANTINI, 2012).

Na Figura 15 iremos analisar apenas a porção de serviço.

Figura 15 - Válvula DB-60
Válvula DB-60



Fonte: Bergantini (2012, p.12)

A válvula DB-10 faz parte de um conjunto de válvula que tem como nome DB-60. Nesse conjunto temos duas porções, assim como as válvulas já citadas acima. As válvulas DB-10 apesar de terem um conjunto formado por porção de serviço, emergência e suporte de encanamento, no Brasil segundo especialistas do setor ferroviário, nos vagões de bitola métrica, apenas é utilizado a porção de serviço, uma vez que não é necessário todo o conjunto, reduzindo os custos de aplicação desta válvula.

O conjunto de válvulas DB-60 é composto por: Serviço, emergência e suporte de encanamentos. Responde às variações de pressão no encanamento geral, enviando ou removendo volumes de ar do cilindro de freio, aplicando ou aliviando.

3 FMEA – ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E SEUS EFEITOS

Com o passar dos anos e o desenvolvimento tecnológico em ascensão, as máquinas passaram a ficarem cada vez mais rápidas mais robustas e conseqüentemente complexas, ocasionando novos tipos de falha e deficiências.

Por esses motivos é necessário buscar uma matéria prima de maior qualidade, operadores ainda mais eficientes, entre outros fatores, que contribuem para o surgimento de máquinas que necessitam de manutenção de qualidade e eficiência (NEPOMUCENO, 1989).

Os planos de manutenção visam, portanto, garantir maior operacionalidade, constantemente são realizados esforços para reduzir os custos causados por possíveis paradas de máquina nas fábricas, quando parte ou toda a linha de produção pode estar fora de serviço. Para planejar tal estratégia corporativa é necessário um projeto de manutenção, que minimiza desvios relacionados à entrega de produtos ou serviço, garantindo a qualidade do produto final (CASTRO et al., 2018)

Segundo a Associação de Normas Técnicas (ABNT, 1994), o conceito de manutenção é uma combinação de todas as medidas técnicas e administrativas (incluindo medidas de supervisão) necessárias para manter ou gerir um item a uma condição de desempenhar uma função necessária (ABNT). A FMEA é uma técnica de análise que pode fornecer informações úteis para os planos de manutenção.

A FMEA é uma técnica analítica usada por um engenheiro e equipe como um meio de garantir que, na medida do possível, modos de falha potenciais e suas causas e mecanismos associados sejam identificados. Em sua forma mais resumida, a FMEA é um resumo de conhecimento do engenheiro e equipe (incluindo análise de possíveis itens falhos baseados em experiências e problemas passados) de como o produto ou processo é desenvolvido (FORD MOTOR COMPANY, 1996).

É um método sistemático que se concentra na prevenção de falhas de um sistema, projeto ou até mesmo processo, por meio de uma abordagem que identifica modos de falha, frequência e impacto. (ALMANNAI et al., 2008).

Segundo Siementkowski (2016), a FMEA para o sistema de freio pneumático de um vagão de carga apresentou um resultado razoável, pois constatou-se que os modos de falha listados na tabela FMEA corresponderam às falhas listadas nos eventos de solução de problemas e manutenção corretiva, o que torna o método

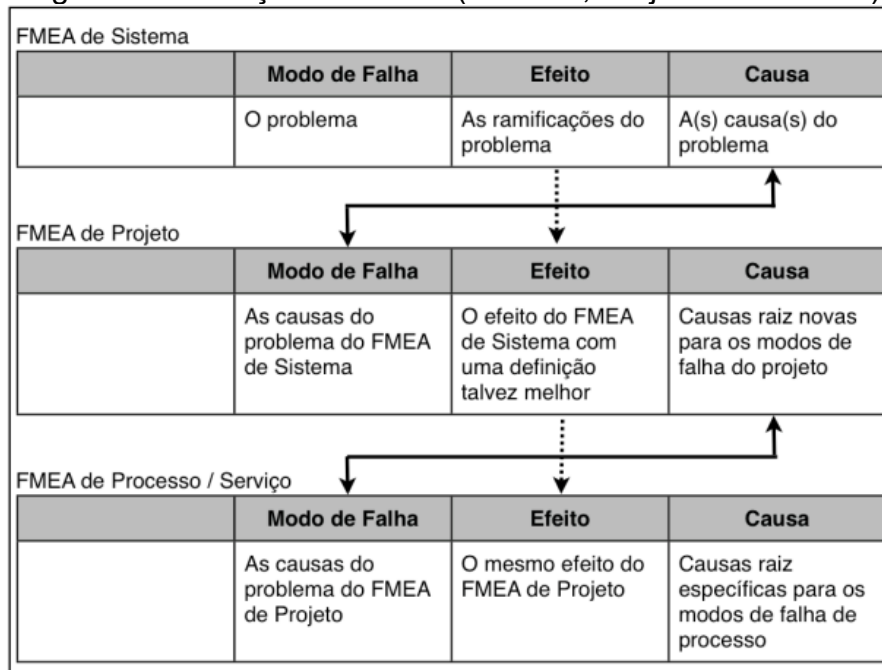
aplicado mais confiável e aplicável para usá-lo.

Ferreira et al. (2021), concluiu que no ano de 2020 com os dados extraídos do histórico de ocorrência de falhas do corredor Centro Leste (Ferrovia), 66% do total de falhas era no sistema de freio, chegando através de um diagrama de Pareto, apontando que 80% das falhas estavam presentes em 6 componentes, podendo direcionar o estudo.

Uma das principais dificuldades na utilização da FMEA é a compreensão dos conceitos de modo de falha, causa e efeito. Com efeito, dependendo da abordagem e do tipo de FMEA, um mesmo fator pode ser tratado de forma diferente, como por exemplo, a *fadiga*, que pode ser a causa ou o modo de falha, dependendo do objetivo da análise de falha ou tipo de análise. Assim, além de definir claramente os fatores da FMEA, é necessário entender os tipos de FMEA e a abordagem de implementação (DIAS, 2011).

Segundo Stamatis, a FMEA de um sistema é utilizada como passagem para a FMEA de Projeto, que também serve para a FMEA de Processo (STAMATIS, 2003), conforme a Figura 16.

Figura 16 - Partição da FMEA (Sistema, Projeto e Processo)



Fonte: STAMATIS (2003, p. 108-110).

A FMEA funciona particionando as etapas, a primeira etapa um grupo identifica as funções do sistema, de componente ou peça, as possíveis falhas que pode se acometer, as causas e os efeitos derivados destas. Em seguida é analisado

o risco (NPR) que cada falha pode fornecer e então são avaliadas quais medidas de melhoria e ações podem ser aplicadas de forma a atenuar os riscos analisados (SIEMENTKOWSKI, 2016).

Além do tipo da FMEA, também pode-se classifica-la pela abordagem, sendo a abordagem funcional (Quadro 2) mais genérica, e que não leva tanto termos técnicos e nem detalhamento do efeito ou causa do modo de falha.

Quadro 2 - Abordagem Funcional

Componente	Função	Modo de Falha
Válvula de Serviço	Carregamento do Sistema	Não Carrega Composição

Fonte: Autor, 2023

Segundo Sakurada (2001), a abordagem estrutural precisa de informações de engenharia mais precisas e mais difíceis de serem concedidas. Nas duas abordagens citadas é muito importante que se tenha a função do componente bem definida, pois é a base para verificar quando o item falha ou não. No quadro 3 é possível entender como funciona a abordagem estrutural.

Quadro 3 - Abordagem Estrutural

Componente	Função	Modo de Falha
Válvula de Serviço	Carregamento do Sistema	Vazamento na válvula de gaveta (Falta de Lapidação)

Fonte: Autor, 2023

Essas informações podem ser compiladas na tabela que será utilizada durante o restante da aplicação da FMEA, como se pode ver no Quadro 4.

Quadro 4 - Tabela de Preenchimento da FMEA

Componente	Função	Falha Funcional	Modo de Falha	Efeito do modo de Falha	Severidade (S)	Causas do Modo de Falha	Ocorrência (O)	Controles Atuais	Deteção (D)	NPR

Fonte: Autor, 2023

3.1.1 Componente

Componente ou item que será analisado pela FMEA.

3.1.2 Função

É o requisito mínimo de operação de um componente. A função que se espera do componente executar.

3.1.3 Falha Funcional

Nas abordagens já citadas podemos descrever os modos de falha em falha funcional ou estrutural. A funcional basicamente é a falta de função do componente (SAE, 2002). Por exemplo, a válvula de controle tem como função carregar o sistema, aplicar os freios, e fazer a soltura dos mesmos. Portanto, uma falha funcional pode ser interpretada como não aplicação dos freios, devido à falta de ar pressurizado nos cilindros de freio. A abordagem estrutural, leva em consideração modos de falha ligados à engenharia, como empenamento, fadiga ou trinca (SAE, 2002).

3.1.4 Modo de Falha

Quando o componente deixa de executar sua função conforme solicitado e não atende aos requisitos de trabalho, isso pode ser interpretado como um defeito. O problema, a preocupação, a oportunidade de melhoria, a falha. Quando se fala em modos potenciais de falha, associa-se a perda da função do sistema – uma falha específica. Em cada função de um sistema identificado, neste caso uma válvula de controle do sistema de freio pneumático de um vagão de carga, deve-se listar sua falha correspondente no sistema, onde na abordagem funcional, o modo de falha é a falha funcional, e na abordagem estrutural, o modo de falha é a causa da falha funcional (SAKURADA, 2001).

3.1.5 Efeito do Modo de Falha

Os efeitos do modo de falha são consequências que passam a surgir no sistema que são causados pelos modos de falha. São identificados, e posteriormente avaliados e registrados para cada tipo específico de modo de falha (SAKURADA, 2001).

3.1.6 Causa do Modo de Falha

A origem do modo de falha é a responsável por desencadeá-lo. Pode estar presente no componente, nos componentes adjacentes ou no ambiente (SAKURADA, 2001).

3.1.7 Controles Atuais

São medidas preventivas e detectivas que já foram adotadas para inibir ocorrências das causas do modo de falha. Para solucionar um problema de engenharia, é possível utilizar diferentes métodos, como testes, revisão de projeto ou análise detalhada. Esses métodos podem ser simples, como o brainstorming, ou complexos e avançados, como a simulação computacional (SAKURADA, 2001).

3.1.8 Índice de Severidade (S)

O índice de severidade indica a gravidade do efeito do modo de falha potencial. Esse índice é sempre aplicado ao efeito do modo de falha e há uma correlação direta entre eles. A revisão do sistema é realizada sob diferentes pontos de vista, incluindo outros sistemas, o produto, o cliente e/ou as normas governamentais. O índice de gravidade só pode ser alterado com uma mudança no projeto e pode ter valores de 1 a 10. (Quadro 5).

3.1.9 Índice de Ocorrência (O)

Para estimar o número de falhas que podem ocorrer, é utilizado um índice que leva em consideração a probabilidade de ocorrência da causa e, posteriormente, do modo de falha. É possível reduzir esse índice por meio de melhorias nas especificações de engenharia e nos requisitos (SAKURADA, 2001). (Ver Quadro 6).

3.1.10 Índice de Detecção (D)

Os sistemas de controle possuem a importante função de identificar e atuar nas falhas (causas ou modos de falha) antes que estas atinjam os clientes (internos ou externos). Para avaliar a eficiência de cada controle, é necessário estimar sua

habilidade. No índice de detecção os valores assumidos são de “1” a “10”. Este índice de detecção pode ser diminuído trazendo ou aprimorando algumas técnicas de avaliação (SAKURADA, 2001) (Ver Quadro 7).

3.1.11 Número de Prioridade de Risco (NPR)

Permite comparar a gravidade de diferentes modos de falha e, assim, priorizar ações corretivas para os casos mais graves. É o produto dos índices de severidade, ocorrência e detecção (SAKURADA, 2008). NPR é um indicador de que uma cadeia causal pode ser mais importante e melhor analisada.

Quadro 5 - Classificação do Índice de Severidade

Efeito	Crterios: Severidade do Efeito no Produto	Classificação
Falha em Atender a Requisitos de Segurança e/ou Regulat3rios	Modo de falha potencial afeta a operaç3o segura do ve3culo e/ou envolve n3o conformidade com regulamentaç3o governamental, sem pr3vio aviso.	10
	Modo de falha potencial afeta a operaç3o segura do ve3culo e/ou envolve n3o conformidade com regulamentaç3o governamental, com pr3vio aviso.	9
Perda ou degradaç3o de Funç3o Prim3ria	Perda de funç3o prim3ria (Ve3culo Inoper3vel, n3o afeta a operaç3o segura do ve3culo).	8
	Degradaç3o de funç3o prim3ria (Ve3culo oper3vel, mas com um n3vel reduzido de desempenho)	7
Perda ou degradaç3o de Funç3o Secund3ria	Perda de funç3o secund3ria (Ve3culo oper3vel, mas as funç3es de conforto/conveni4ncia est3o inoper3veis).	6
	Degradaç3o de funç3o secund3ria (Ve3culo oper3vel, mas as funç3es de conforto/conveni4ncia s3o reduzidas)	5
Inc3modo	Apar4ncia ou ru3ido aud3vel, ve3culo oper3vel, item n3o conforme e percebido pela maioria dos clientes (>75%)	4
	Apar4ncia ou ru3ido aud3vel, ve3culo oper3vel, item n3o conforme e percebido por muitos clientes (>55%)	3
	Apar4ncia ou ru3ido aud3vel, ve3culo oper3vel, item n3o conforme e percebido por clientes observadores (>25%)	2
Nenhum Efeito	Nenhum Efeito Percept3vel	1

Fonte: Adaptado de SAE, 2022

Quadro 6 - Classificaç3o do Índice de Ocorr4ncia

Crterios para avaliar a Probabilidade de Ocorr4ncia (O) da Causa da Falha			
Falhas em funç3o do tempo de Operaç3o (Horas)	Falhas em Funç3o do Ciclo Operacional (Ciclos)	Confiabilidade baseada no Tempo Requerido pelo Cliente	Classificaç3o
1 em 1	1 em 90	$C(t) < 1\% \rightarrow TMEF \equiv 10\%$ do tempo em operaç3o	10
1 em 8	1 em 900	$C(t) = 5\% \rightarrow TMEF \equiv 30\%$ do tempo em operaç3o	9
1 em 24	1 em 36.000	$C(t) = 19\% \rightarrow TMEF \equiv 60\%$ do tempo em operaç3o	8
1 em 80	1 em 90.000	$C(t) = 37\% \rightarrow TMEF =$ tempo em operaç3o	7

Cr�terios para avaliar a Probabilidade de Ocorr�ncia (O) da Causa da Falha			
Falhas em fun�o do tempo de Opera�o (Horas)	Falhas em Fun�o do Ciclo Operacional (Ciclos)	Confiabilidade baseada no Tempo Requerido pelo Cliente	Classifica�o
1 em 350	1 em 180.000	C(t) = 61% → TMEF 2x maior do que o tempo em opera�o	6
1 em 1.000	1 em 270.000	C(t) = 78% → TMEF 4x maior do que o tempo em opera�o	5
1 em 2.500	1 em 360.000	C(t) = 85% → TMEF 6x maior do que o tempo em opera�o	4
1 em 5.000	1 em 540.000	C(t) = 90% → TMEF 10x maior do que o tempo em opera�o	3
1 em 10.000	1 em 900.000	C(t) = 95% → TMEF 20x maior do que o tempo em opera�o	2
1 em 25.000	1 em mais de 900.000	C(t) = 98% → TMEF 50x maior do que o tempo em opera�o	1
1 em 2.500	1 em 360.000	C(t) = 85% → TMEF 6x maior do que o tempo em opera�o	4
1 em 5.000	1 em 540.000	C(t) = 90% → TMEF 10x maior do que o tempo em opera�o	3
1 em 10.000	1 em 900.000	C(t) = 95% → TMEF 20x maior do que o tempo em opera�o	2
1 em 25.000	1 em mais de 900.000	C(t) = 98% → TMEF 50x maior do que o tempo em opera�o	1

Fonte: Adaptado de SAE, 2002

Quadro 7 - Classifica o do  ndice de Detec o

Chances de Detec�o	Cr�terios para Avaliar a Probabilidade de Detec�o (D) da Causa de Falha	Classifica�o
Quase Imposs�vel	Os dispositivos de controle existentes n�o ir�o detectar uma causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha. Ou n�o existe um dispositivo de controle relacionado com essa causa/mecanismo	10
Muito Remota	A possibilidade que os dispositivos de controle existentes detectem a causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha � muito remota	9
Remota	A possibilidade que os dispositivos de controle existentes detectem a causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha � remota	8
Muito Baixa	A possibilidade que os dispositivos de controle existentes detectem a causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha � muito baixa	7
Baixa	A possibilidade que os dispositivos de controle existentes detectem a causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha � baixa	6
M�dia	A possibilidade que os dispositivos de controle existentes detectem a causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha � moderada	5
Moderadamente Alta	A possibilidade que os dispositivos de controle existentes detectem a causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha � moderadamente alta	4
Alta	A possibilidade que os dispositivos de controle existentes detectem a causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha � alta	3
Muito Alta	A possibilidade que os dispositivos de controle existentes detectem a causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha � muito alta	2
Quase Certa	A possibilidade que os dispositivos de controle existentes detectem a causa/mecanismo potencial e subsequente modo de falha � quase certa	1

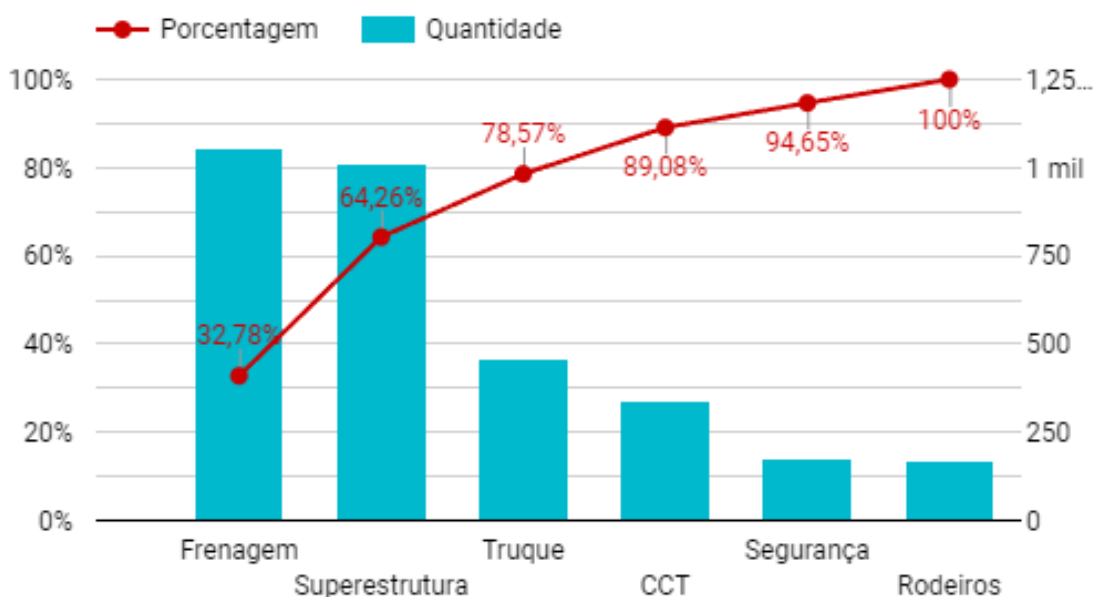
Fonte: Adaptado de SAE, 2002

4 APLICAÇÃO DA FMEA NA VÁLVULA DE CONTROLE DO SISTEMA DE FREIO PNEUMÁTICO DE UM VAGÃO DE CARGA

A Empresa na qual os dados técnicos e conhecimentos heurísticos foram trazidos, é uma operadora de transporte de carga por modal ferroviário. A malha sul que passa por 4 estados diferentes tem uma extensão de malha ferroviária aproximadamente de 14.000km, sendo toda esta extensão bitola métrica, onde é mais usual apenas a porção de serviço da válvula de controle. A Empresa transporta em sua grande maioria commodities agrícolas, combustíveis e produtos industrializados. Devido a passagens de nível, estado da via permanente e capacidade de carga, a velocidade média de operação dos trens da Empresa é de 40 km/h. Isso resulta e reflete na ciclagem de solicitação do freio da composição.

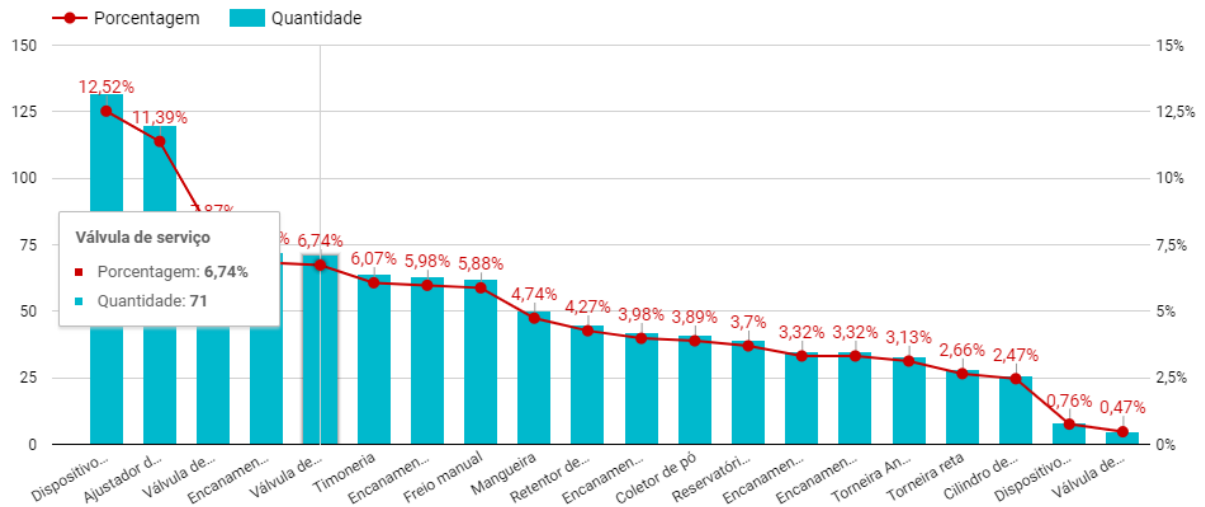
A ferramenta FMEA em válvulas de controle de vagões de carga é aplicada para tratar os modos de falha do sistema e/ou minimizar seu impacto. Para selecionar o sistema técnico a ser analisado pela FMEA, foi analisado que o sistema de frenagem dos trens são os que mais possuem modo de falha representando 33% de todos os modos de falhas listados, sendo 7% relacionados a válvulas de controle, como podemos ver nas Figuras 17 e 18 respectivamente.

Figura 17 - Mapeamento dos Modos de Falha de Conjunto



Fonte: Autor, 2023

Figura 18 - Mapeamento dos Modos de Falha de Sistema



Fonte: Autor, 2023

A obtenção de dados para a execução do FMEA foi efetuada mediante a condução de entrevistas com peritos da indústria ferroviária, em conjunto com a equipe de Inteligência de Negócios, que provia informações estatísticas para fins de análise. A colaboração dos engenheiros no início do processo do FMEA ocorreu mediante o preenchimento do formulário especificado (Ver Tabela 5).

A escolha de especialistas do setor ferroviário para as entrevistas foi fundamentada na necessidade de obter conhecimentos aprofundados e experiência prática na área.

Quadro 8 - Formulário FMEA

ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL - FMEA									
FMEA		Nº:		RESPONSÁVEL:					
DATA DE INÍCIO:		REVISÃO:		PREPARADO POR:					
EQUIPE:									
REQUISITOS									
FUNÇÃO	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO POTENCIAL DA FALHA	SEVERIDADE	CAUSA E MECANISMO POTENCIAL	OCORRÊNCIA	CONTROLES ATUAIS DO PROCESSO	DETECÇÃO	NP R	AÇÕES RECOMENDADAS

Fonte: Autor, 2023

4.1 Equipe Responsável pela Elaboração da FMEA

Na elaboração da FMEA, foi montada uma equipe responsável para

trabalhar na montagem do formulário, analisando os modos de falha, e também elencando os modos de falha mais críticos e mantendo a coerência no estudo do trabalho.

- Um engenheiro de vagões;
- Um estudante de Engenharia Ferroviária;
- Um técnico mecânico que atua no setor de manutenção de rodas;
- Um engenheiro especialista em válvulas de controle do sistema de freio pneumático;
- Uma especialista de Segurança Ferroviária.

Nas reuniões e entrevistas com os especialistas do setor, foi discutido sobre o componente responsável pelo controle do sistema de frenagem de vagões (válvulas de controle), como ela funciona, quais seus modos de falha, impacto dos modos de falha, dados de severidade, ocorrência e detecção e por fim ações recomendadas.

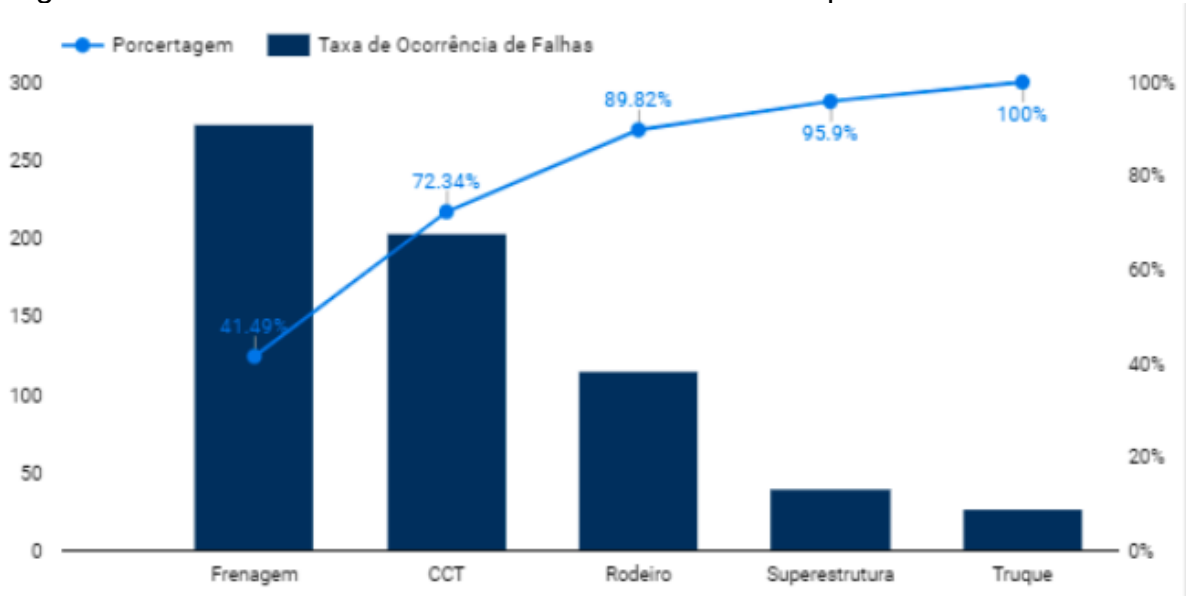
4.1.1 Coleta de dados e preparação da FMEA

Neste ponto do processo, é necessário coletar todas as informações disponíveis sobre os componentes a serem analisados, tais como: diagramas de projetos anteriores, desenhos técnicos, especificações de normas operacionais, normas técnicas pertinentes, procedimentos de teste e inspeção, registros e relatórios de avarias, política de manutenção da empresa, etc.

Para isso, além de todos os dados coletados e citados anteriormente, também se teve acesso às Árvores de Falha (FTA – Fault Tree Analysis) que se subdivide em seis sistemas, como: Controle Choque Tração (CCT), Frenagem, Rodeiros, Segurança, Superestrutura e Truque, contendo aproximadamente 3300 modos de falhas, bem como um documento que continha todas as taxas de ocorrência de falhas de 2021 até 2022, separados em trimestres. Também se teve acesso a plataforma de base de dados das taxas de ocorrência de falhas, fornecidos pelo time de Business Intelligence da empresa, onde no período de um ano foi constatado que teve 273 ocorrências de falhas no sistema de frenagem, num total de 41,49% de todas as ocorrências, (Ver Figura 19). Além disso foi constatado que destas ocorrências de frenagem tivemos ocorrências de válvulas DB-10 (Porção de Serviço), e outras ocorrências nas válvulas ABDX, totalizando 50 ocorrências,

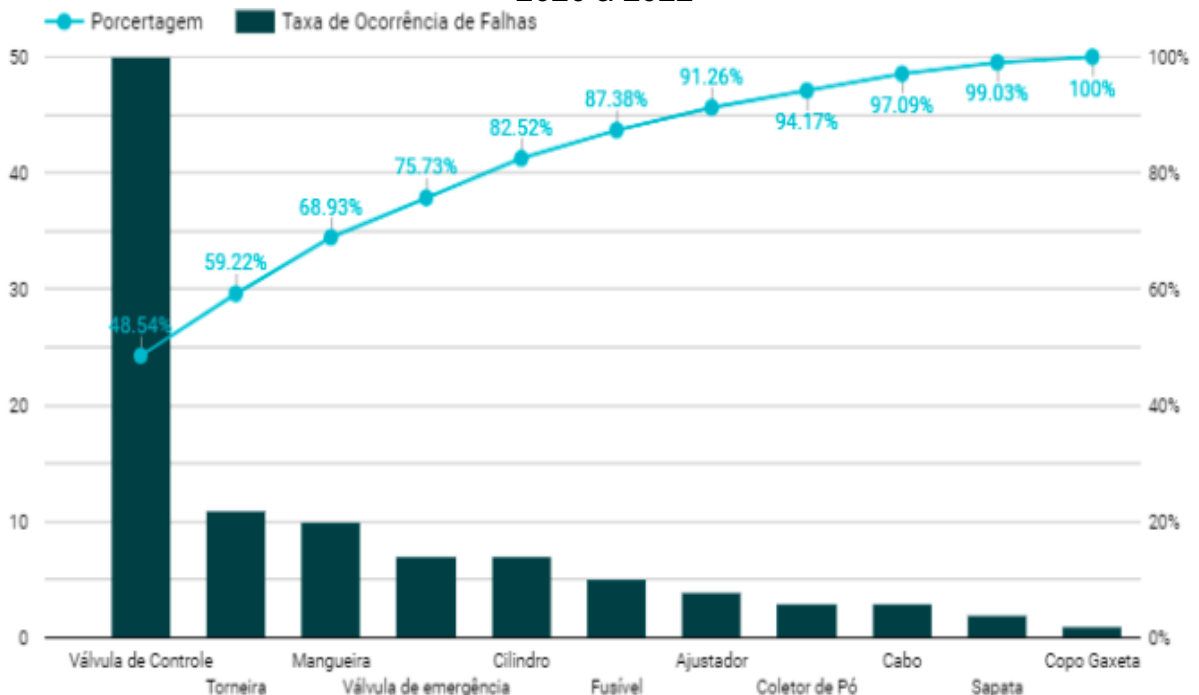
48,54% (Ver Figura 20). Também foi consultado o registro de ocorrências de cada trimestre de 2020 até 2022. No ano de 2020 teve-se 199 ocorrências de falha no sistema de frenagem, 221 em 2021 e 238 em 2022, gerando um aumento de sinalizando um aumento de 19,6% em dois anos, fato que comprova a necessidade de uma análise mais detalhada para que estes números diminuam (Ver Figura 21).

Figura 19 - Taxa de ocorrência de falhas em sistemas no período de 2020 a 2022



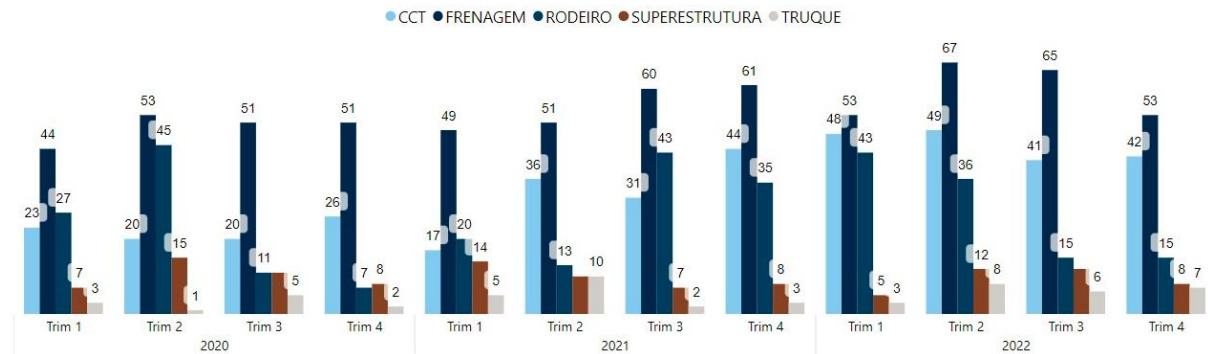
Fonte: Autor, 2023

Figura 20 - Taxa de ocorrência de falhas no sistema de frenagem no período de 2020 a 2022



Fonte: Autor, 2023

Figura 21 - Taxa de ocorrência de falhas nos sistemas nos períodos de 2020 a 2022



Fonte: Autor, 2023

4.1.2 Identificação dos modos de falha, efeitos e causas

A obtenção de dados detalhados foi realizada por meio de entrevistas diretas com especialistas do setor ferroviário, cujo conhecimento heurístico proporcionou orientações para a execução do preenchimento da tabela de análise. Em seguida, foram selecionados especialistas do setor ferroviário com expertise em sistemas de freio pneumático de vagões de carga. As entrevistas foram conduzidas de forma direta, permitindo a obtenção de dados detalhados e insights relevantes.

Durante as entrevistas, os especialistas compartilharam conhecimentos aprofundados sobre as válvulas de controle utilizadas nos sistemas de freio pneumático. Foram discutidos aspectos técnicos, funcionais e operacionais das válvulas, bem como suas principais características, modos de operação e desempenho esperado.

Da mesma forma, as causas mais prováveis dos modos de falha foram listadas com base nos dados coletados, no conhecimento experimental do grupo de trabalho e em alguns dados estatísticos (informações sobre taxas de ocorrência de falhas e modo de falhas através da FTA e causas de eventos ferroviários na empresa).

4.1.3 Determinando o Índice NPR

Para determinar o Índice NPR, para cada falha, é necessário estabelecer o índice de ocorrência, severidade e detecção. Uma lista de verificação deve ser elaborada, listando as causas, efeitos e índices de criticidade. A Tabela 1 apresenta os resultados da FMEA aplicado, os campos Severidade, Ocorrência, Detecção e Número de Prioridade de Risco indicados pelas letras S, O, D e NPR.

Tabela 1 - FMEA da válvula de controle do sistema de freio pneumático de um vagão de carga

COMPONENTE	FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	EFEITO DO MODO DE FALHA	S	CAUSAS DO MODO DE FALHA	O	CONTROLES ATUAIS	D	NPR
Válvula de Controle (ABDX)	Gerenciar o carregamento do reservatório	Não realiza o carregamento completo do reservatório	Pistão da válvula de serviço inoperante antes do carregamento	Assume posição indesejada, não causando o carregamento do sistema e consequentemente gerando não aplicação dos freios (Roda Fria)	9	Atrito no deslocamento do pistão de serviço	5	Teste de dinamômetro de deslocamento do pistão (Aparelho utilizado no pistão para verificar força de arrasto)	2	90
						Diafragma do pistão de serviço rompido	4	Teste de bancada AB na reparação e Teste Single Car na liberação do vagão	2	72
						Válvula de Gaveta e graduadora travada	5	Teste de bancada AB na reparação e Teste Single Car na liberação do vagão	4	180
						Contaminação de agentes externos	3	Teste de bancada AB na reparação e Teste Single Car na liberação do vagão	4	108
			Vazamento na Válvula de Gaveta e Válvula graduadora antes do carregamento	Não carrega o sistema, gerando alívio dos freios	8	Falha na vedação da gaveta com a sede	2	Teste de Bancada AB	2	32
			Vazamento na Válvula de Retenção de Serviço Rápido	Falta de pressão no cilindro de freio Não aplica a frenagem	8	Atrito no deslocamento do pistão de serviço	2	Teste de Bancada AB	1	16
						Vazamento na Válvula de gaveta devido à má lapidação	1	Teste de Bancada AB	1	8
						Rompimento do diafragma do pistão de serviço	2	Teste de Bancada AB	2	32
			Falta de anel de vedação antes do carregamento	Não carrega o sistema de freio, gerando alívio dos freios ou Roda Fria	8	Falta de torque na montagem da Válvula	2	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	3	48

COMPONENTE	FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	EFEITO DO MODO DE FALHA	S	CAUSAS DO MODO DE FALHA	O	CONTROLES ATUAIS	D	NPR
			Vazamento da junta da tampa de serviço Rápido antes do carregamento	Vazamento antes do carregamento, causa não aplicação dos freios (Roda Fria)	4	Endurecimento da borracha	2	Teste Single Car	3	24
						Trinca na tampa	4	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	2	32
						Contaminação da borracha	3	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	2	24
			Vazamento pelo Retentor	Alívio do cilindro de freio, gerando deficiência de frenagem	8	Falha na vedação da gaveta com a sede, devido a contaminantes externos	4	Lapidação Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	1	32
			Trinca nas peças metálicas da válvula	Não aplica frenagem (Roda Fria)	8	Oxidação	2	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	3	48
						Vandalismo	3	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	2	48
						Falha de Fundição	2	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	3	48
						Transporte e armazenamento da válvula	1	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	2	16
						Colisão durante a operação ferroviária	2	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	2	32
			Danos no diafragma	Não aplica frenagem (Roda Fria)	8	Falha no processo de fabricação	2	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	1	16

COMPONENTE	FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	EFEITO DO MODO DE FALHA	S	CAUSAS DO MODO DE FALHA	O	CONTROLES ATUAIS	D	NPR			
					8	Falha na manutenção e montagem da válvula	2	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	1	16			
						Vazamento pelo Corpo da Válvula	Gera Alívio dos Freios, deficiência de frenagem	8	Falta de Torque na Montagem da Válvula	2	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	6	96
									Parafusos do Corpo da Válvula Frouxo	7	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	5	280
									Diafragma Rompido	5	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	5	200
									Contaminação de agentes externos	8	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	6	384
Válvula de Controle (ABDX)	Controlar o acionamento dos freios	Não liberar a vazão estipulada de ar comprimido do reservatório para o cilindro	Válvula de gaveta indevidamente posicionada	Aplicação indesejada de freio de serviço	10	Pouco atrito entre anel metálico e bucha	1	Teste de dinamômetro de deslocamento do pistão (Aparelho que coloca no pistão para verificar força de arrasto)	2	20			
		Não liberar a vazão estipulada de ar comprimido do reservatório para o cilindro	Vazamento da junta da tampa de serviço Rápido depois do carregamento	Vazamento posterior ao carregamento, causando aplicação indesejada do freio de serviço (Freio Agarrado)	5	Endurecimento da borracha	3	Teste Single Car	3	45			
						Trinca na tampa	3	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	2	30			
						Contaminação da borracha	2	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	1	10			
Não liberar a vazão estipulada de ar comprimido do reservatório para o cilindro	Vazamento na válvula de Gaveta e Válvula graduadora depois do carregamento	Aplicação indesejada de freio de serviço	10	Falha na vedação da gaveta com a sede	3	Teste de Bancada AB	1	30					

COMPONENTE	FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	EFEITO DO MODO DE FALHA	S	CAUSAS DO MODO DE FALHA	O	CONTROLES ATUAIS	D	NPR
		Não liberar a vazão estipulada de ar comprimido do reservatório para o cilindro	Pistão da válvula de serviço inoperante depois do carregamento	Não alívio dos freios no tempo desejado, conforme o comprimento do encanamento geral, Travamento ou demora no alívio dos freios, podendo gerar falha na roda	10	Vazamento na pressão de ar do encanamento geral	4	Teste de bancada AB na reparação e Teste Single Car na liberação do vagão	2	80
						Travamento do pistão	5	Teste de bancada AB na reparação e Teste Single Car na liberação do vagão	3	150
						Vazamento interno das passagens da pressão de ar do cilindro de freio	4	Teste de bancada AB na reparação e Teste Single Car na liberação do vagão	3	120
						Vazamento da pressão de ar do encanamento geral para a atmosfera	2	Teste de bancada AB na reparação e Teste Single Car na liberação do vagão	2	40
Válvula de Controle (ABDX)	Controlar a liberação de ar do cilindro para aliviar o freio	Falta de pressão nos reservatórios auxiliares e de emergência	Obstrução no orifício da entrada de ar para o reservatório	Não aplica cilindro de freio, gerando deficiência de frenagem	8	Obstrução no orifício de carregamento na montagem indevida ou por agentes externos	5	Teste de Bancada AB	8	320
						Atrito no deslocamento do pistão	6	Teste de Bancada AB	7	336
						Vazamento da válvula de gaveta, devido à má Lapidação do material ou contaminação externa	6	Teste de Bancada AB	6	288
						Obstrução ou vazamento no reservatório combinado e encanamento, devido a problemas de montagem ou agentes externos	7	Teste de Bancada AB	6	336
						Diafragma Rompido (Por erro no processo de fabricação)	5	Teste de Bancada AB e Teste Single Car	5	200

COMPONENTE	FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	EFEITO DO MODO DE FALHA	S	CAUSAS DO MODO DE FALHA	O	CONTROLES ATUAIS	D	NPR
		Válvula não alivia a pressão do cilindro de freio	Falta de anel de vedação de borracha pós carregamento	Freio Agarrado	9	Falha na manutenção da válvula	3	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	5	135
		Válvula não alivia a pressão do cilindro de freio	Vazamento pelas junções das peças da válvula	Freio Agarrado	9	Juntas Ressecadas	3	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	6	162
	Vazamento devido à falta de aperto nos parafusos de fixação das válvulas no bloco.					3	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	7	189	
	Falta de torque na montagem da válvula					2	Teste Estanqueidade (Espuma de Água e Sabão)	4	72	
		Válvula não alivia a pressão do cilindro de freio	Válvula de Gaveta Travada na posição de Serviço	Freio Agarrado	9	Vedação do Filtro com folga	7	Teste de Sensibilidade de Alívio e Teste Single Car	7	441
	Atrito entre anel metálico e bucha excessivo					5	Teste de Sensibilidade de Alívio e Teste Single Car	8	360	
	Empeno das gavetas internas					6	Teste de Sensibilidade de Alívio e Teste Single Car	6	324	

Fonte: Autor, 2023

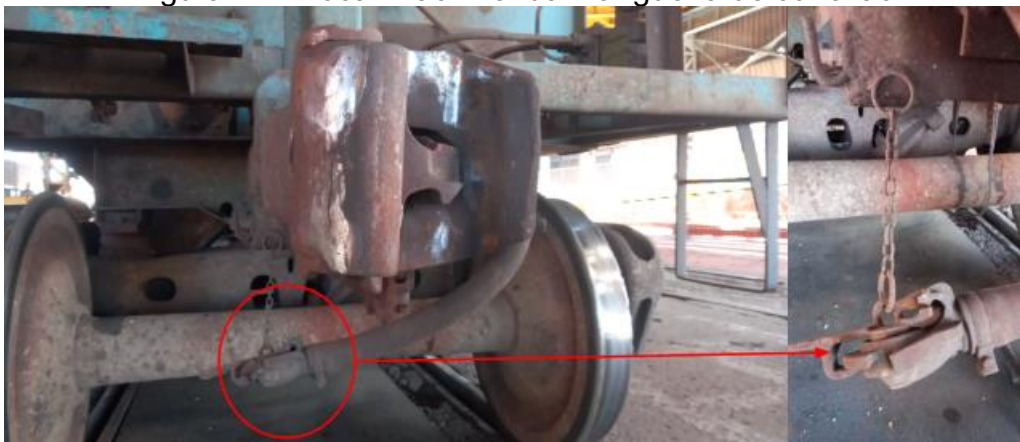
4.1.4 Detalhamento dos modos de falha

No presente trabalho de aplicação da FMEA em uma válvula de controle foram identificados vários modos de falha diferentes, e também classificado conforme sua severidade, ocorrência e detecção. Dentre todos os modos de falha listados, verificou-se que os mais críticos segundo o NPR, foram o travamento da válvula de gaveta e a obstrução de orifícios de entrada de ar da válvula de controle ABDX.

Segundo especialistas do setor ferroviário, continua sendo o problema mais difícil de sanar, uma vez que, o ambiente de manutenção deve ser controlado. Outro problema é a grande quantidade de contaminantes que um vagão pode ter após um transporte de carga. As mangueiras por onde entram o ar pneumático devem estar sempre isoladas, isto quando as mangueiras de conexão não estão interligadas entre vagões (cauda do vagão), ou quando a locomotiva precisa acoplar-se ao restante da composição. Para isso precisa-se obrigatoriamente fazer o uso do Bocal F, que impede que contaminantes espalhem-se pela tubulação. Essa sujeira, pode percorrer o encanamento geral e danificar a válvula.

A continuação, serão apresentadas figuras que detalham alguns dos modos de falha mais críticos da válvula, com o intuito de salientar detalhes da própria falha nos componentes ou peças. Como podemos ver na Figura 22, o bocal F deve estar sempre fechando as mangueiras expostas à atmosfera.

Figura 22 - Bocal F ao final da mangueira de conexão



Fonte: Autor, 2023

Já no caso do travamento da gaveta, pode-se notar que devido ao tipo de material utilizado na sede da gaveta, uma liga metálica de bronze e latão, faz com

que esse material tenha uma alta sensibilidade, e maleabilidade. Isso faz com que a empresa necessite ter um controle rigoroso de suas válvulas de gaveta, pois elas podem conter riscos, até mesmo em seu transporte, ou numa colisão de transporte.

Devido a sua função ser de extrema importância na aplicação e alívio do freio, é imprescindível que o cuidado seja dobrado nesse componente. A empresa possui uma lapidadora dentro da oficina de manutenção, que faz a lapidação do material quando se faz necessário.

Na Figura 23, podemos ver um diafragma rompido. Na desmontagem da válvula foi identificado que o diafragma estava com 2 rasgos em lados opostos próximo das extremidades, evidenciando o motivo da falha de operação do pistão.

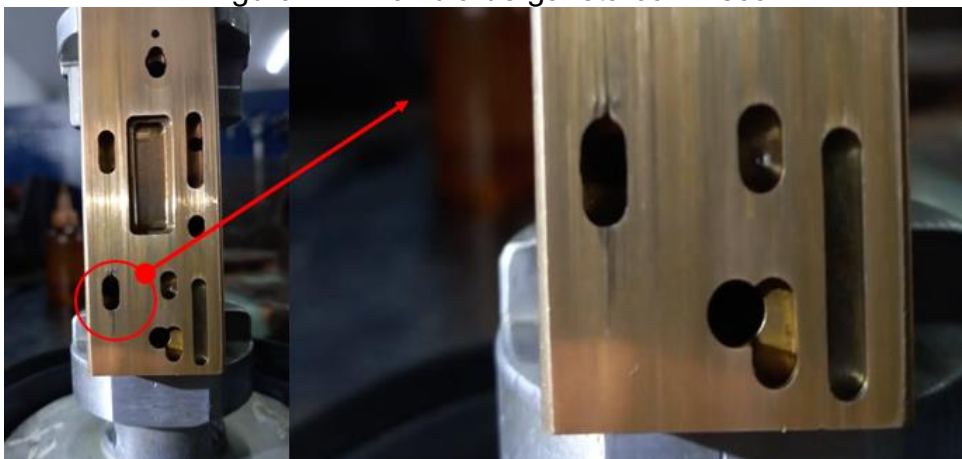
Figura 23 - Diafragma Rompido



Fonte: Autor, 2023

No outro modo de falha encontrado pode-se identificar que à vazamento pela válvula de gaveta. Na desmontagem da válvula, foi identificado riscos na válvula de gaveta e na sede. Isso pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - Válvula de gaveta com risco



Fonte: Autor, 2023

Em outro modo de falha, pode-se observar que há vazamento na junta da válvula, constatado pelo teste de estanqueidade (Água e Sabão), gerando diversas bolhas em partes do corpo da válvula (Figura 25). Nesse caso, a válvula com vazamento, é difícil especificar o que pode estar gerando isto. Por isso, é importante fazer a abertura da mesma e identificar a causa.

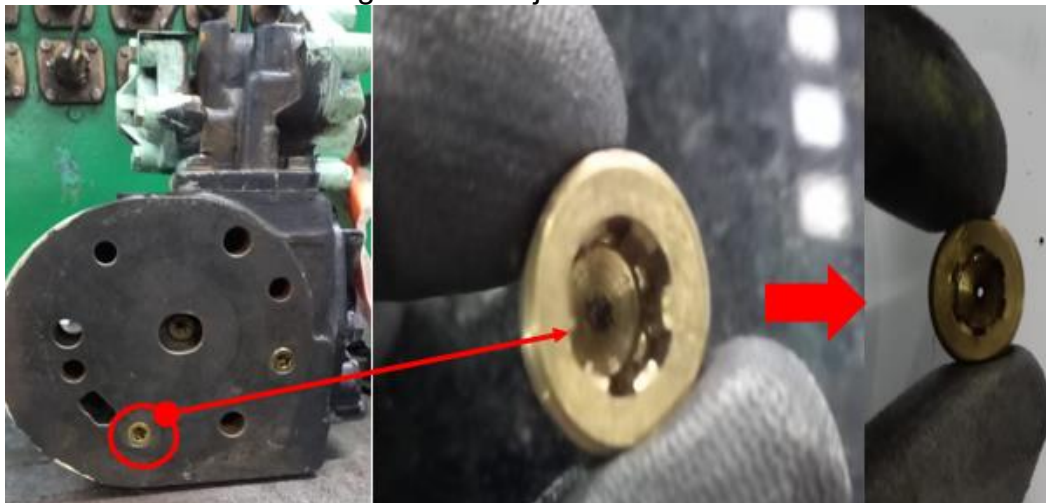
Figura 25 - Vazamento na junta da válvula



Fonte: Autor, 2023

Na desmontagem da válvula pode ser observado e identificado que o bujão estava com sujeira, ou seja, obstruído (Figura 26).

Figura 26 - Bujão Obstruído



Fonte: Autor, 2023

Outra causa de um vazamento pelo corpo da válvula pode ser um diafragma com rasgos (Figura 29). Na desmontagem da válvula foi identificado que o diafragma

estava com rasgo próximo das extremidades, evidenciando o motivo da falha de operação do pistão.

Figura 27 - Diafragma com rasgo



Fonte: Autor, 2023

4.1.5 Análise das ações recomendadas

O preenchimento da FMEA, conforme apresentado na Tabela 6, destacou em *VERMELHO* as falhas que obtiveram pontuação superior a 300 no NPR (Nível de Prioridade de Risco). Essas falhas representaram os principais impactos na Empresa durante o período de 2020 a 2022 e, portanto, exigem uma análise mais aprofundada por parte da equipe responsável pela FMEA.

Dentre as falhas destacadas, o travamento da válvula de gaveta foi identificado como o modo de falha mais grave, obtendo 441 pontos no NPR. Esse alto índice deve-se ao elevado número de ocorrências em válvulas ABDX de serviço durante o referido período, causando transtornos significativos para as operações e impactando o índice de THP (Horas de Trem Parado).

As falhas mais graves representam um risco significativo para as operações da Empresa, levando a equipe a elaborar um conjunto de ações visando direcionar as tratativas necessárias. Na Tabela 7, são apresentadas as ações recomendadas para prevenir novas ocorrências relacionadas às falhas com pontuação acima de 300 no NRP.

É importante ressaltar que a elaboração dessas ações é baseada em uma análise aprofundada das causas raízes das falhas identificadas. Dessa forma, a equipe busca abordar os pontos críticos e implementar medidas efetivas para mitigar os riscos e evitar a repetição dessas falhas no futuro.

Essas ações recomendadas são baseadas nas diretrizes de manutenção da

empresa, e, além disso, essa tabela demonstra um comprometimento com a segurança, confiabilidade e eficiência das operações ferroviárias.

Tabela 2 - Tabela de ações recomendadas

COMPONENTE	MODO DE FALHA	EFEITO DO MODO DE FALHA	CAUSAS DO MODO DE FALHA	S	O	D	Ações Recomendadas
Válvula de controle (ABDX)	Vazamento pelo Corpo da Válvula	Gera Alívio dos Freios, deficiência de frenagem	Contaminação de agentes externos	8	8	6	1 - Controlar o ambiente para evitar contaminação de agentes externos. 2 - Utilizar aspirador de pó e material de limpeza na célula de freio.
Válvula de controle (ABDX)	Válvula de Gaveta Travada na posição de Serviço	Freio Agarrado	Vedação do Filtro com folga		7	7	1 - Manutenção Periódica da válvula a cada 3 meses. 2 - Realizar a limpeza do coletor de pó, trocar as juntas das válvulas, e trocar filtro do suporte de válvulas. 3 - Controlar a qualidade da lapidação da válvula de gaveta na inspeção de manutenção corretiva. 4 - Garantir que o teste de single car seja realizado em todos os vagões que passarem por manutenção preventiva ou avaria de freio.
			Atrito entre anel metálico e bucha, excessivo	9	5	8	

Fonte: Autor, 2023

4.1.6 Considerações Finais

Além disso, a realização deste estudo proporcionou um aprendizado técnico valioso ao autor do trabalho, especialmente em relação ao sistema de frenagem pneumática, e destacou a utilidade da ferramenta FMEA.

Este trabalho apresentou desafios significativos devido à falta de conhecimento prático na área. Sem experiência prévia, foram enfrentadas

dificuldades em compreender e aplicar conceitos específicos relacionados ao tema do estudo, dificuldades que foram superadas com o estudo detalhado do tema, por meio de bibliografias, consultas a professores e conhecimento heurístico dos funcionários da empresa.

A falta de familiaridade com as práticas e ferramentas utilizadas na análise de dados de falha, como o método FMEA, acrescentou uma camada adicional de complexidade ao trabalho. Foi preciso dedicar um tempo considerável para pesquisar, estudar e assimilar esses conhecimentos, a fim de superar a lacuna prática e realizar o estudo de forma eficiente.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar os modos de falhas que ocorrem na válvula de controle do sistema de freio pneumático de um vagão de carga, com o intuito de identificar as principais causas das falhas, avaliar seu impacto na manutenção e propor ações recomendadas para mitigar essas ocorrências. Dita análise foi feita baseada em dados de uma empresa do setor ferroviário durante o período de 2020 a 2022.

Uma avaliação previa nos dados fornecidos pela empresa revelou que o sistema de freio foi responsável pela maior proporção de falhas, correspondendo a 41% do total, o que ressaltou a importância de priorizar a questão abordada neste estudo. Adicionalmente, foi verificado inicialmente por meio do Diagrama de Pareto, que 48% das ocorrências estavam relacionadas a válvulas de controle, componente analisado neste trabalho.

Com base nessa informação, a aplicação da FMEA nas válvulas de controle que apresentaram maior incidência de falhas possibilitou uma compreensão mais ampla das características desses componentes. Assim mesmo, por meio do cálculo do NPR, foi possível identificar os modos de falha que representavam risco.

Dessa forma, concentrando-se apenas nos modos de falha de maior risco, a equipe pôde desenvolver ações direcionadas que abrangiam tanto a manutenção corretiva quanto a preventiva dos componentes. As ações recomendadas seguiram a política de manutenção padrão da empresa e, com base nos resultados da análise, espera-se uma redução significativa na frequência dos modos de falha. As descobertas resumidas na FMEA podem ser incorporadas às decisões de priorização da manutenção para os sistemas de freio de vagões de carga.

Em conclusão, a aplicabilidade deste estudo foi demonstrada em um cenário real, e as ações propostas para solucionar as falhas são viáveis e passíveis de implementação.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se, que posteriormente, seja feito uma nova aplicação da FMEA para a porção de emergência e também do suporte de encanamentos da válvula de controle ABDX, a fim de completar a análise já feita na porção de serviço.

REFERÊNCIAS

- ALAS, Layda Faustina Anselmo. **Aplicação da Metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade em Locomotivas da Frota RJ – MRS**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- ALMANNAI, B. et al. **A decision support tool based on qfd and FMEA for the selection of manufacturing automation technologies**. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, v. 24, n. 4, p. 501–507, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462:1994: Confiabilidade e Manutenibilidade – Terminologia**. Rio de Janeiro, 1994.
- BENTLEY, J. M.; BENTLEY JR, J. **The freight train emergency brake system and a method to calculate stop distance and time**. *SAE Transactions*, JSTOR, p. 74–89, 2007.
- BORBA, José Luiz; BERGANTINI, Mauro Antônio. **Dinâmica e Frenagem Ferroviária**. Faculdade Brasileira UNIVIX. Vitória, ES, 2011.
- CASTRO, R. et al. **Metodologia para Gestão de Manutenção Empresarial.**, v. 1, n. 1, p. 1–14, 2008.
- DIAS, Acires, et al. **Metodologia para Análise de Risco: mitigação de perda de SF6 em disjuntores**. Florianópolis, SC, 2011.
- ERMER, G. et al. **Steps toward integrating function-based models and bond-graphs for conceptual design in engineering**. *Automated Modeling for Design*, ASME, v. 47, n. 11, p. 47–62, 1993.
- FERREIRA, F. G. **Teste de degradação em buchas de válvulas ab**. 2019. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- FERREIRA, et al. **Aplicação do FMEA em análise de modos de falhas em sistema de freio de vagão carga geral**. FERREIRA, Bruno de Castro SILVA, Evandro Alves da LIMA, Gustavo Fernandes Negriz, p. 14–19, 2021.
- HELMAN, H.; ANDREY, P.R.P. **Análise de falhas (aplicação dos métodos de FMEA e FTA)**. Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995.
- NEPOMUCENO, Lauro X., **Técnicas de Manutenção Preditiva**. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 1989.
- RIBEIRO, D. F. **Desenvolvimento de modelos para simulação em tempo real da frenagem de composições ferroviárias de carga**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

SAKURADA, E. Y. **As técnicas de análise dos modos de falhas e seus efeitos e análise da árvore de falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina Centro Tecnológico Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2001.

SILVEIRA, M. R. Transporte e logística: as ferrovias no brasil. **Geosul**, v. 17, n. 34, p.63–86, 2002.

SANTOS, G. F. **Análise da confiabilidade de válvulas de controle de freio de vagões ferroviários**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

SIEMENTKOWSKI, N. F. **Análise de Modos de Falhas em Sistema de Freio de Vagão de Carga Com Aplicação de FMEA**. Trabalho de Conclusão Do Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, Faculdade de Engenharia Ferroviária e Metroviária, 2016.

SAKURADA, Eduardo Yuji, et al. **Failure Mode And Effects Analysis FMEA**. Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos – NEDIP. Florianópolis, SC, 2008.

STAMATIS, D. H. **Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution**. [S.l.]: Quality Press, 2003. 108–110 p.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **Surface Vehicle Recommended Practice J1739: (R) Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA), and Potential Failure Mode and Effects Analysis for Machinery (Machinery FMEA)**. 2002.

SILVA, Julio. **Evolução das Válvulas de Serviço**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

TEODORO, I. P. **Estudo do comportamento do sistema de freio pneumático de trens de carga utilizando o método dos volumes finitos**. Dissertação (Mestrado) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2017.

TORRACCA, N. A. Produtividade e qualidade do sistema de transporte ferroviário decargas. 1996.

WU, Q. et al. **Freight train air brake models**. International Journal of Rail Transportation, Taylor & Francis, p. 1–49, 2021.

GLOSSÁRIO

Atrito entre anel metálico e bucha: Contato metal-metal do pistão interno da válvula de controle do tipo ABDX.

Roda Fria: Não há aplicação dos freios, alívio contínuo.

Freio agarrado: Não há alívio dos freios, aplicação contínua.

Gaveta (válvula de controle): Direcionadores internos da válvula de controle, assume posições variadas com um grau de liberdade.

Teste Single Car: Teste de frenagem do vagão isolado em área de manutenção, o aparelho Single Car é ligado à rede de ar comprimido e simula as aplicações de freio da locomotiva.

Teste Estanqueidade: Teste utilizado durante o Single Car, para verificar se existe algum vazamento nas válvulas de controle, através de uma mistura de água e sabão.