

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

GUSTAVO FERREIRA SANTOS

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE VÁLVULAS DE CONTROLE DE
FREIO DE VAGÕES FERROVIÁRIOS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2019

GUSTAVO FERREIRA SANTOS

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE VÁLVULAS DE CONTROLE DE
FREIO DE VAGÕES FERROVIÁRIOS**

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rigoni

Co-orientador: Prof. Denis Mazzei

CURITIBA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE VÁLVULAS DE CONTROLE DE FREIO DE VAGÕES FERROVIÁRIOS

por

Gustavo Ferreira Santos

Esta monografia foi apresentada em 04 de outubro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues, Dr.
Membro Titular da Banca - UTFPR

Prof. Wanderson Stael Paris, MSc. Eng.
Membro Titular da Banca - UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho à minha esposa Ana Carolina e à minha filha Maria Eduarda, fontes de inspiração e alegria em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo dom da vida e à minha família pela confiança, apoio e motivação em sempre estudar e buscar novos desafios.

Também agradeço aos colegas de trabalho da supervisão de Confiabilidade de Vagões Estrada de Ferro Vitória a Minas pelas contribuições, direcionamentos e exemplos.

Sem dados você é apenas mais uma pessoa com uma opinião. (DEMING, Willian Edwards, 1960)

RESUMO

SANTOS, Gustavo F. ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE VÁLVULAS DE CONTROLE DE FREIO DE VAGÕES FERROVIÁRIOS. 2019. 71 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O Brasil é um país de dimensões continentais e grande exportador de *commodities*. O transporte ferroviário é bastante competitivo no transporte deste tipo de carga, com grandes volumes e com centros produtores distantes dos portos. Com função de manutenção da velocidade e proporcionar paradas de emergência nos trens, o sistema de freio tem no conjunto de válvulas de controle seu principal componente. Desta forma, o funcionamento do conjunto dentro dos parâmetros definidos pela ferrovia e sua confiabilidade, estão bastante ligados à correta definição do período de seu plano de manutenção. Este trabalho apresenta um estudo de LDA das válvulas de serviço e de emergência, que compõem o conjunto de válvulas utilizadas em vagões GDE utilizados para transporte de minério de ferro, analisando sua confiabilidade e fornecendo subsídio para revisão da estratégia de manutenção incluindo sua periodicidade. O estudo utilizou dados reais de manutenção cadastrados no sistema informatizado, onde ordens e notas de manutenção foram analisados e classificados conforme sua natureza para definição do tipo de dado. O software Weibull++ 11 foi utilizado para aplicação de modelos estatísticos e análise das curvas pdf e confiabilidade. Estes valores foram comparados à estratégia atual e com isso, sugeridas mudanças na periodicidade do plano de manutenção preventiva. Concluiu-se que a periodicidade do plano preventivo pode ser alterada de 75 meses para 96 meses, sem que os objetivos de confiabilidade da frota sejam comprometidos.

Palavras-chave: Manutenção de Vagões. Análise de Dados de Vida. Análise de Confiabilidade. Válvulas de Freio.

ABSTRACT

SANTOS, Gustavo F. ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE VÁLVULAS E CONTROLE DE FREIO DE VAGÕES FERROVIÁRIOS. 2019. 71 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Brazil is a country of continental dimensions and a major exporter of commodities. Rail transport is very competitive in the transport of this type of cargo, with large volumes and with producing centers far from the ports. With the function of maintaining speed and providing emergency stops on trains, the brake system has in the control valve set its main component. Thus, the operation of the set within the parameters defined by the railroad and its reliability are closely linked to the correct definition of the period of its maintenance plan. This paper presents an LDA study of the service and emergency valves, which make up the set of valves used in GDE wagons used for iron ore transportation, analyzing their reliability and providing support for review of the maintenance strategy including its periodicity. The study used real maintenance data registered in the computerized system, where maintenance orders and notes were analyzed and classified according to their nature to define the data type. Weibull ++ 11 software was used to apply statistical models and analysis of pdf curves and reliability. These values were compared to the current strategy and thus suggested changes in the periodicity of the preventive maintenance plan. It was concluded that the periodicity of the preventive plan can be changed from 75 months to 96 months, without compromising fleet reliability objectives.

Palavras-chave: Wagons Maintenance. Life Data Analysis. Reliability Analysis. Brake Valves.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Visão geral do freio de um vagão ferroviário.....	23
Figura 2.2 - Visão geral conjunto pneumático do freio de um vagão ferroviário.....	24
Figura 2.3 – Conjunto de válvulas de controle modelo DB-60, fabricante Knorr-Bremse.....	24
Figura 2.4 - Do compressor ao cilindro de freio - caminho percorrido pelo ar comprimido.....	25
Figura 2.5 - Sistema de freio em vagões dual.....	25
Figura 2.6 - Fluxo de ar na configuração de carregamento.....	26
Figura 2.7 - Fluxo de ar na configuração de serviço.....	27
Figura 2.8 - Fluxo de ar na configuração de alívio.....	28
Figura 2.9 - Conjunto de válvulas de controle modelo DB-60.....	29
Figura 3.1 - Função densidade de probabilidade para uma variável aleatória contínua.....	34
Figura 3.2 - Área abaixo da pdf.....	35
Figura 3.3 - Curva da banheira idealizada.....	36
Figura 3.4 - Posicionamento da média e da mediana em uma pdf assimétrica.....	37
Figura 3.5 - Representação esquemática de um dado completo.....	38
Figura 3.6 - Representação esquemática de dados suspensos.....	39
Figura 3.7 - Representação esquemática de dados agrupados.....	40
Figura 3.8 - Representações gráficas e matemáticas de diversas distribuições estatísticas.....	41
Figura 3.9 - pdf e cdf para distribuição Weibull.....	44
Figura 4.1 - Teste de aderência para válvulas de serviço.....	48
Figura 4.2 - Tabela de dados do Testes de Aderência de válvulas de serviço.....	49
Figura 4.3 - Teste de aderência para válvulas de emergência.....	50
Figura 4.4 - Tabela de dados do Testes de Aderência de válvulas de serviço.....	50
Figura 4.5 - Gráfico da cdf para válvulas de serviço.....	51
Figura 4.6 - Gráfico da cdf para válvulas de emergência.....	52
Figura 4.7 - Identificação dos parâmetros para conjunto de válvulas de controle (a) válvulas de serviço e (b) válvulas de emergência.....	53
Figura 4.8 - Gráfico da pdf para válvulas de serviço.....	54
Figura 4.9 - Gráfico da pdf para válvulas de emergência.....	55
Figura 4.10 - Confiabilidade vs. Tempo para válvulas de serviço.....	56
Figura 4.11 - Confiabilidade para missão de 75 meses - válvula de serviço.....	57
Figura 4.12 - Confiabilidade vs. Tempo para válvulas de emergência.....	57
Figura 4.13 - Confiabilidade para missão de 75 meses - válvula de emergência.....	58
Figura 4.14 - Vida B10% para válvulas de serviço.....	59
Figura 4.15 - Vida B10% para válvulas de emergência.....	59
Quadro 2.1 - Funções do conjunto de válvulas de controle DB-60.....	30
Quadro 4.1 - Classificação dos dados oriundos das notas de manutenção.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Proporção das válvulas de controle	46
Tabela 4.2 - Classificação geral dos dados analisados.....	48
Tabela 4.3 - Consolidação dos parâmetros para função Weibull-2P.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS

LDA	<i>Life Data Analysis</i>
pdf	Função Densidade de Probabilidade de Falha
cdf	Função Densidade Acumulada de Falha
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	17
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivo Específico	18
1.3	JUSTIFICATIVA.....	19
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	SISTEMA DE FREIO DE VAGÕES DE CARGA.....	21
2.1	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA FREIO	22
2.1.1	Conjunto Pneumático	23
2.2	CONFIGURAÇÕES DAS VÁLVULAS DE CONTROLE	26
2.2.1	CARREGAMENTO	26
2.2.2	SERVIÇO	27
2.2.3	RECOBRIMENTO	27
2.2.4	ALÍVIO	28
2.2.5	EMERGÊNCIA.....	28
2.2.6	FUNÇÕES DO CONJUNTO DE VÁLVULAS DE CONTROLE.....	29
2.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	31
3	CONFIABILIDADE E ANÁLISE DE DADOS DE VIDA.....	32
3.1	CONFIABILIDADE.....	32
3.2	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA.....	32
3.2.1	DADOS COMPLETOS	38
3.2.2	DADOS SUSPENSOS.....	38
3.2.3	DADOS AGRUPADOS	39
3.3	MODELOS ESTATÍSTICOS	40
3.3.1	DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	41
3.3.2	Distribuição Exponencial	42
3.3.3	DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL	42
3.3.4	DISTRIBUIÇÃO DE WEILBULL.....	43
3.4	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	60
5	CONCLUSÕES	61
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país continental e um grande exportador de commodities, sendo que os produtos que representam a maior parte destas exportações possuem baixo valor agregado, grandes volumes e demandam transporte por grandes distâncias, como exemplo têm-se o minério de ferro, soja, açúcar, entre outros.

Dentro deste cenário, o modal ferroviário apresenta-se como um modal bastante competitivo, reduzindo custos e conseqüentemente aumentando a competitividade dos produtos transportados. No Brasil este modal possui uma participação pouca expressiva em relação ao modal rodoviário por exemplo, mesmo possuindo vantagens relevantes tais como, vias exclusivas, pouca influência de tráfego, além de alta eficiência energética e baixo impacto ambiental (REIS; MIGUEL, 2015).

O minério de ferro é o principal produto transportado por vias férreas no Brasil, representando 74,2% de toda a carga transportada por vias férreas em 2017. Devido ao grande volume transportado a frota de vagões dedicada a este transporte é bastante grande e com utilização intensa (AGÊNCIA CNT, 2018).

Isto exige que sua manutenção seja ágil, de modo que sua liberação das oficinas seja rápida, dentro dos critérios exigidos de confiabilidade e segurança operacional.

Os vagões GDE são próprios para o transporte de granéis sólidos resistentes a intempéries, como por exemplo o minério de ferro e possuem como principal característica a descarga em virador de vagões, ou seja, sua estrutura permite giro de 180°, mesmo quando acoplado a outros vagões.

Pode-se subdividi-los em alguns sistemas bastante característicos e que possuem pontos de interação entre si, são eles, rodeiro, truque, freio, superestrutura, segurança e conjunto de choque e tração.

O sistema freio é composto basicamente de componentes pneumáticos, formados por encanamentos e mangueiras, conjunto de válvulas de controle, válvula vazio-carregado, retentor de alívio e cilindro de freio e por componentes mecânicos, tais como alavancas de força, tirantes de carga, ajustadores de folgas, triângulos de freio e sapatas de freio.

O conjunto de válvulas de controle é responsável por determinar a aplicação e alívio do freio do vagão, controlando características de velocidade e intensidade de aplicação. É composto por uma válvula de serviço, por uma válvula de emergência e por um bloco de válvulas, que realiza a conexão das válvulas com a linha de ar comprimido do vagão, bem como a interligação entre as válvulas de serviço e emergência.

Na frota de vagões analisada neste trabalho os sistemas possuem planos de manutenção independentes, com periodicidade e escopo específicos. Para o sistema freio, objeto de estudo deste trabalho, o plano de manutenção possui ações com periodicidade de 15 e 75 meses.

Nos intervalos de manutenção de 15 meses são realizadas basicamente ações de verificação da condição operacional dos equipamentos e no intervalo de 75 meses são realizadas trocas preventivas de todos os componentes do sistema, além de uma verificação dos parâmetros operacionais dos componentes instalados no vagão, realizada como procedimento de liberação do vagão após ambas as intervenções.

A periodicidade do plano preventivo de 75 meses foi definida e recomendada pelo fabricante, sendo que este não apresenta aos usuários estudos que fundamentem esta periodicidade ou propostas para seu aumento.

Isto porque a velocidade de degradação dos componentes varia entre os tipos de vagão e entre as diversas ferrovias, uma vez que as características de relevo, transporte e operação dos trens, leva a desempenhos e curvas de confiabilidade diferentes.

Observando o vagão, o conceito de confiabilidade está relacionado à sua capacidade percorrer um trecho definido da ferrovia sem causar paradas não programadas nos trens. Isto é fator crítico para os indicadores operacionais de toda a ferrovia, causando perdas por lucro cessante e impactos negativos nos indicadores de desempenho.

Porém, quando observamos o sistema de freio o conceito de confiabilidade se expande, uma vez que o conjunto de válvulas de controle de frenagem precisa estar dentro de parâmetros adequados de resposta, para que a operacionalidade do trem seja permitida, mesmo que muitas vezes estas funções não causem paradas indesejadas do trem durante uma viagem.

Os conjuntos de válvulas de controle pneumáticas mais modernos existentes no mercado apresentam 20 funções operacionais (NYAB, 2000), sejam elas compartilhadas mutuamente entre válvula de serviço e válvula de emergência ou exclusivas de cada uma destas válvulas.

Considerando que a ferrovia estudada opera com trens que variam de 84 a 336 vagões do tipo GDE, a uniformidade na aplicação e no alívio dos freios é fator crítico para uma boa condução e operação segura dos trens.

Conhecendo-se a frota atual e as periodicidades do plano preventivo, tem-se uma demanda de manutenção anual de 2024 planos preventivos de 75 meses e 10120 planos preventivos de periodicidade de 15 meses.

Além desta demanda de manutenções preventivas, manutenções corretivas são realizadas, oriundas de inspeções nos pontos de carregamento e descarga ou de problemas detectados durante a circulação dos vagões.

Desta forma, conhecer a curva de densidade de probabilidade e a confiabilidade das válvulas de controle ao longo de sua vida é importante quando se deseja avaliar seu comportamento e utilizar esta informação como subsídio para escolha de uma estratégia de manutenção mais adequada ao cenário operacional ferroviário.

Uma estratégia que permita uma utilização plena dos ativos e forneça subsídios para possíveis reduções de custos anuais com manutenção preventiva, sem aumentar a taxa de corretivas começa a se alinhar a uma visão de maximização da produtividade e da vida dos ativos.

Assim, este trabalho tem como objetivo realizar o estudo de análise de dados de vida (LDA) das válvulas de controle utilizadas em vagões GDE utilizados no transporte de minério de ferro, fornecendo subsídios para realização de uma revisão da estratégia de manutenção atual, além de permitir a avaliação sobre a adequação desta estratégia à um aproveitamento completo da vida do parque de válvulas.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

Para Barbosa (2017), o conjunto de ações necessárias, ou seja, o detalhamento do que fazer para garantir confiabilidade de uma instalação ou de um equipamento, pode ser chamado de estratégia de manutenção.

A estratégia de manutenção definida para os vagões GDE contempla o tratamento do vagão como composto de diversos sistemas, sendo, superestrutura, truque, rodeiro, conjunto de choque e tração, segurança e freio.

Basicamente, utilizam-se técnicas de inspeção sensitiva, métodos preditivos e planos preventivos como base da estratégia de manutenção, sendo que para o sistema freio, sistema que contém o objeto de estudo deste trabalho, possui um plano preventivo de 75 meses.

A definição desta periodicidade é determinada por recomendações dos fabricantes dos componentes do sistema, bem como pela longa experiência que o operador ferroviário possui na operação de seus ativos.

Para um desempenho adequado da gestão da manutenção, Li (2016) diz que é necessária a definição de metas (objetivos), onde para seu alcance, faz-se necessária a definição de uma estratégia de manutenção.

Sendo a confiabilidade um dos indicadores de performance que determinam o alcance ou não do desempenho desejado, conhecer seu valor é peça importante para direcionar ajustes na estratégia de manutenção anteriormente definida.

Sabendo que a NBR 5462 (ABNT, 1994) define confiabilidade como a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo, faz-se necessário entender e definir a melhor forma de organizar os dados de manutenção, de forma que a confiabilidade dos ativos possa ser calculada, utilizando-se de ferramentas estatísticas adequadas.

Com o entendimento da importância da constante adequação da estratégia de manutenção ao estado e condição operacional dos ativos, bem como com as diretrizes estratégicas da empresa, vale destacar algumas premissas que foram utilizadas para classificação dos eventos de manutenção:

- Não é permitida a manutenção de componentes dos vagões fora das oficinas de manutenção de componentes.

- A manutenção preventiva das válvulas de freio se dará com a substituição completa do kit de reparo, fornecido pelo fabricante.
- Nos planos preventivos de 75 meses, todos os componentes de freio do vagão serão substituídos, mesmo possuindo prazo de manutenção menor que 75 meses.
- Todo vagão, ao passar pela oficina, passa por uma avaliação do seu sistema de freio por meio de um teste de freio padrão, sendo que qualquer desvio nos parâmetros de desempenho e funções da válvula levará a sua substituição, por uma válvula nova ou reparada como nova.
- Toda retirada de válvula teve registro feito no sistema informatizado de manutenção, contendo classificação do problema que motivou a troca da válvula.

Com isso, levanta-se o questionamento, problema de pesquisa deste trabalho: Como conhecer a confiabilidade do parque de válvulas de controle de freio de vagões, a fim de fornecer subsídios para revisão da estratégia de manutenção?

1.2 OBJETIVOS

Tendo conhecimento da questão motivadora deste trabalho, cabe detalhar os objetivos geral e específicos, que nortearão esta pesquisa.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um estudo de LDA das válvulas de serviço e válvulas de emergência utilizadas em vagões GDE, analisando sua confiabilidade e fornecendo subsídio para revisão da estratégia de manutenção incluindo sua periodicidade.

1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Para cumprimento do objetivo geral, este trabalho visa cumprir os objetivos específicos descritos abaixo:

- Pesquisar sobre o sistema de freio, contextualizando sobre as funções esperadas por um conjunto de válvulas de controle;
- Realizar pesquisa bibliográfica sobre confiabilidade, análise de dados de vida e distribuições estatísticas;
- Consolidar dados do sistema informatizado de manutenção, organizando os dados e gerando informações para utilização em software de análise de confiabilidade;
- Gerar gráficos de confiabilidade e de função densidade de probabilidade, analisando seu comportamento atual e comparando com a expectativa demandada pela operação ferroviária;
- Propor nova estratégia e periodicidade para o plano de manutenção de sistema de freio em vagões tipo GDE, utilizados no transporte de minério de ferro.

1.3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho justifica-se pela necessidade de levantamento de informações de confiabilidade das válvulas de controle de freio, como forma de definir parâmetros quantitativos para a revisão da estratégia de manutenção do sistema de freio de vagões ferroviários.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Inicialmente o trabalho apresenta uma pesquisa bibliográfica das disciplinas pertinentes a este desenvolvimento, a fim de fornecer subsídios para os as análises práticas de dados reais de manutenção.

Em seguida, são definidos os tipos de ordens de manutenção e notas de manutenção que serão utilizados para definição e classificação de cada tipo de dado.

Os dados serão imputados no software Weibull++ 11, para aplicação de modelos estatísticos e análises das curvas de densidade de probabilidade de falha e de confiabilidade.

Por fim, será realizada comparação dos valores obtidos com a estratégia atual de manutenção e valores esperados de confiabilidade para válvulas de serviço e válvulas de emergência.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos.

O capítulo 1 são apresentados os elementos pré-textuais, com a apresentação do tema e do problema de pesquisa, além de uma breve introdução, as premissas consideradas e a justificativa do estudo.

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre sistema de freio a ar automático utilizado em vagões ferroviários, detalhando as configurações de frenagem e as funções dos conjuntos de válvulas de controle.

O capítulo 3, apresenta referencial teórico de confiabilidade e análise de dados de vida, disciplina da engenharia da confiabilidade utilizada neste trabalho, apresentando as principais distribuições estatísticas, suas características e seus parâmetros.

Já no capítulo 4, são apresentados os tratamentos realizados sobre os bancos de dados do sistema informatizado de manutenção, com ordens de manutenção e notas de manutenção de substituição de válvulas, bem com as análises sobre os resultados apresentados pelo software Weibull++ 11 e proposta de alteração sobre a estratégia de manutenção do sistema de freio.

Por fim, o capítulo 5 revisa o alcance dos objetivos propostos e apresenta as conclusões sobre as análises realizadas, ajustando ou não a estratégia de manutenção atual, além de oferecer sugestões de trabalhos futuros.

2 SISTEMA DE FREIO DE VAGÕES DE CARGA

No início das ferrovias, no século XIX, as composições ferroviárias eram freadas somente pelas locomotivas, que utilizam contravapor e frenagem mecânica acionada por alavancas para realizar esta operação. Isto era suficiente para parar as pequenas composições que trafegavam com pouca velocidade e baixa carga.

George Westinghouse, motivado pela necessidade de aumento dos trens e das cargas, desenvolveu um sistema de freio a ar direto, que consistia basicamente em um grande reservatório de ar dentro da locomotiva, que enviava ar comprimido para pressurização dos cilindros de freio contidos nos vagões, por meio de um encanamento geral.

Problemas relacionados à dinâmica ferroviária dos trens fizeram com que este sistema fosse abandonado, pois o freio era aplicado nos vagões da frente muito antes dos vagões da cauda do trem. Isto causava grandes choques na composição, uma vez que os últimos vagões empurravam os primeiros vagões e a locomotiva, além da perda de freio do vagão em caso de fracionamento do trem (SANTOS, 2017).

Estas carências levaram ao desenvolvimento do sistema a ar automático em 1872. Neste sistema todos os vagões da composição aplicam freio automaticamente em caso de fracionamento do encanamento geral, sendo este o principal ganho deste novo sistema, além de maior uniformidade nas aplicações de freio, sendo que este conceito é utilizado até os dias atuais (BORBA *et al.*, 2011).

Conhecendo esta evolução, vale reforçar o objetivo principal do sistema de freio em uma composição ferroviária, que é controlar com uniformidade, sincronismo e segurança a velocidade do trem, estando este em rampa ou nível, nas condições a seguir:

- Quando o trem tiver de ser parado dentro dos limites de bloqueio estabelecidos pelos sinais de via ou quando sua velocidade tiver de ser mantida constante durante a descida de rampas;
- Durante o estacionamento do trem;
- Por ocasião de frenagens de emergência, em situações de riscos excepcionais, que possam provocar grandes danos materiais ou perdas de vidas humanas (SANTOS, 2019).

O sistema de freio utilizado nos trens de carga brasileiros é do tipo, com pressão positiva no encanamento geral. Este sistema requer que este encanamento seja carregado com ar comprimido para aliviar todos os freios, sendo que quando descarregado, parcial ou completamente, o freio é aplicado.

A seguir, será apresentada uma breve explicação sobre o funcionamento do sistema de freio, ressaltando as principais funções das válvulas de controle de freio.

2.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA FREIO

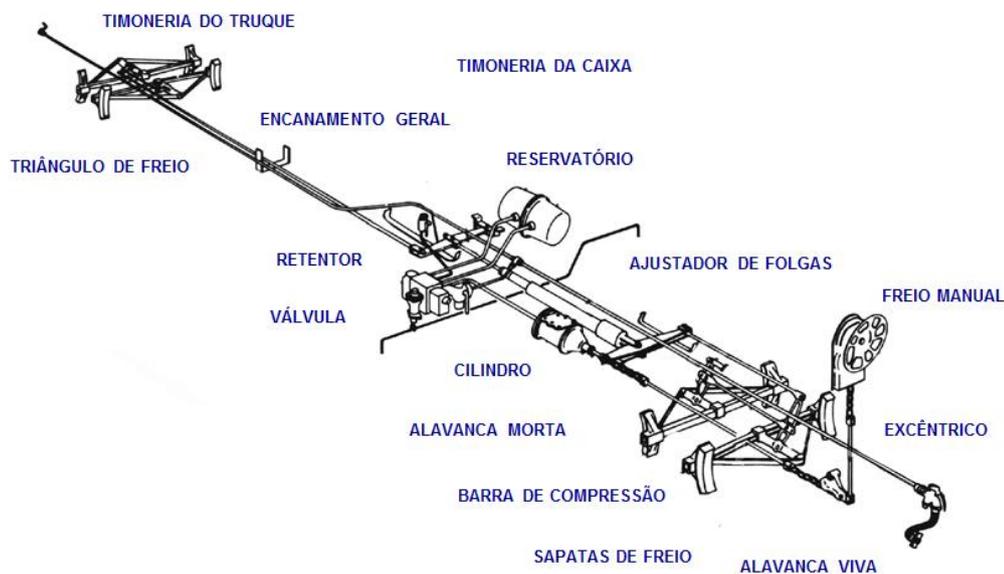
Entendendo que o sistema de freio a ar automático delimita o mecanismo de acionamento dos freios, ou seja, a liberação de volumes de ar para pressurização ou depressurização dos cilindros de freio, cabe também considerar o mecanismo de transmissão da força gerada por esta pressurização.

Desta forma, chamamos de conjunto pneumático, o grupo de componentes formado por válvulas de controle, válvulas auxiliares, reservatórios de ar, cilindros de freio, etc.

Já o grupo de componentes composto por freio manual, ajustador de folgas, timoneria de freio com suas barras, alavancas e triângulos, é chamado de conjunto mecânico (SANTOS, 2019).

A figura 2.1 apresenta uma visão geral da disposição dos componentes no sistema de freio de um vagão ferroviário.

Figura 2.1 - Visão geral do freio de um vagão ferroviário



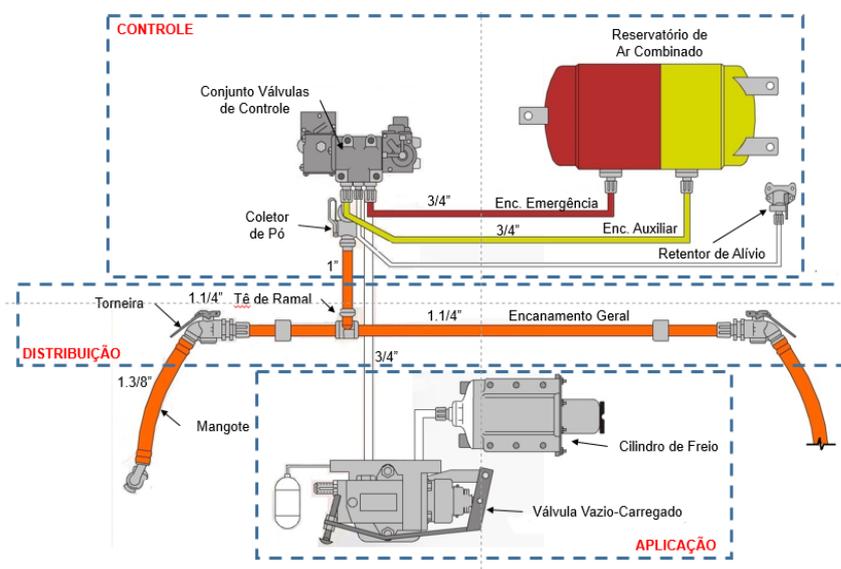
Fonte: SANTOS (2019).

Tendo visto esta básica divisão dentro sistema de freio do vagão de carga, vale aprofundar no sistema pneumático, aonde está instalado o conjunto de válvulas de controle, objeto de estudo deste trabalho.

2.1.1 CONJUNTO PNEUMÁTICO

Trabalhando com o ar comprimido vindo do compressor da locomotiva, o conjunto pneumático pode ser subdividido em distribuição, controle e aplicação, sendo que seu principal componente é o conjunto de válvulas de controle de freio, conforme apresentado na figura 2.2.

Figura 2.2 - Visão geral conjunto pneumático do freio de um vagão ferroviário

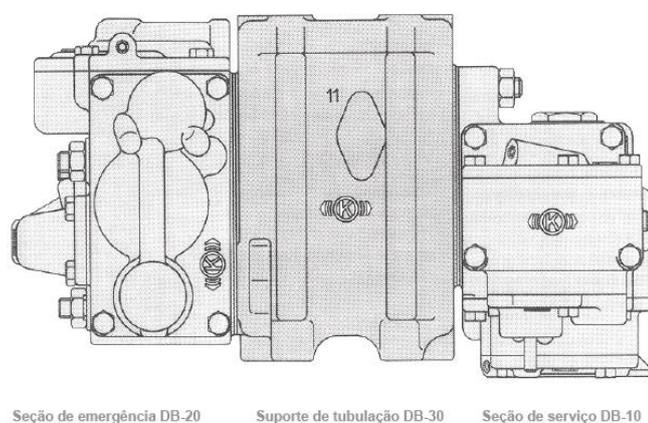


Fonte: SANTOS (2019).

Este conjunto de válvulas, formado por uma válvula de serviço, por uma válvula de emergência e por um suporte de tubulação, reage às variações de pressão no encanamento geral, enviando ou removendo volumes de ar do cilindro de freio, aplicando ou aliviando os freios, respectivamente.

Na figura 2.3, pode-se observar como estão arranjadas estas 3 partes do conjunto de válvulas de controle.

Figura 2.3 – Conjunto de válvulas de controle modelo DB-60, fabricante Knorr-Bremse



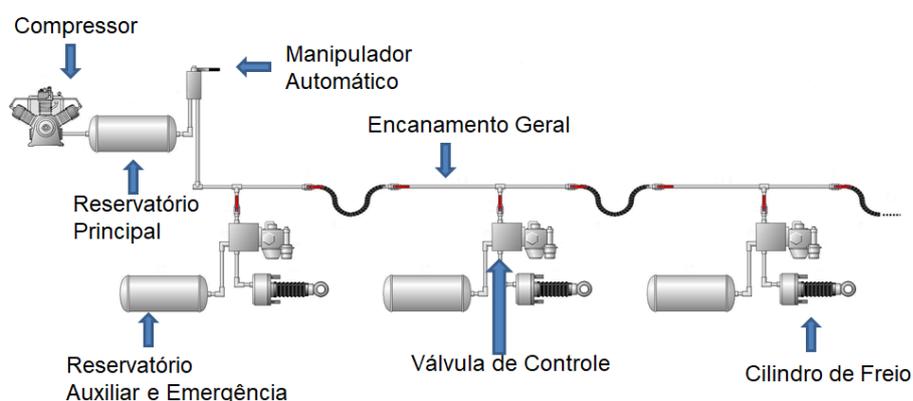
Fonte: NYAB (2000).

A aplicação do freio consiste no envio de um volume de ar pelo conjunto de válvulas de controle para o cilindro de freio, este volume ocupa a câmara interna do

cilindro agindo sobre seu êmbolo, empurrando-o para frente, acionando então a timoneria até que a força de frenagem atinja as rodas.

Na figura 2.4, pode-se o esquema funcional representando o caminho percorrido pelo ar comprimido encaminhado pelo compressor da locomotiva chegando até o cilindro de freio.

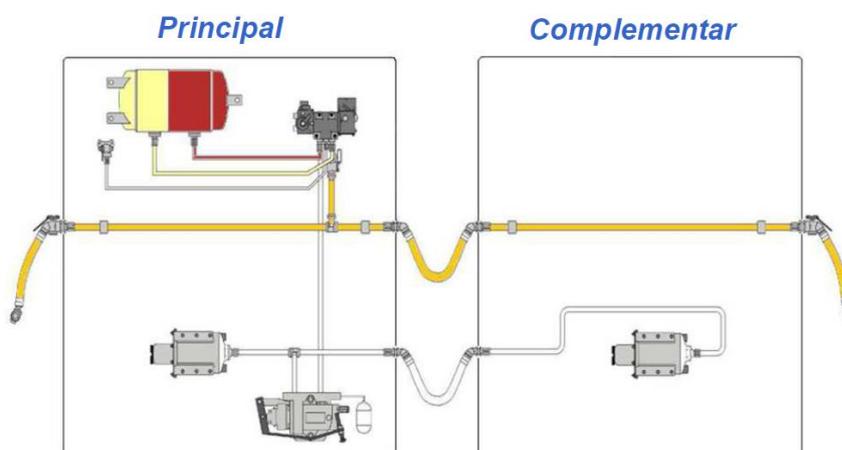
Figura 2.4 - Do compressor ao cilindro de freio - caminho percorrido pelo ar comprimido



Fonte: SANTOS (2019).

Algumas configurações de vagões permitem que um conjunto de válvulas de controle comande a frenagem de dois vagões. Os vagões com esta configuração de freio instalada são chamados de vagões duais, como mostrado na figura 2.5.

Figura 2.5 - Sistema de freio em vagões dual



Fonte: SILVA (2018).

Entendendo que a função básica do conjunto de válvulas de controle é direcionar aplicações e alívios do cilindro de freio, cabe detalhar suas 5 principais configurações de funcionamento e em seguida as 20 funções que garantem o correto funcionamento destas configurações.

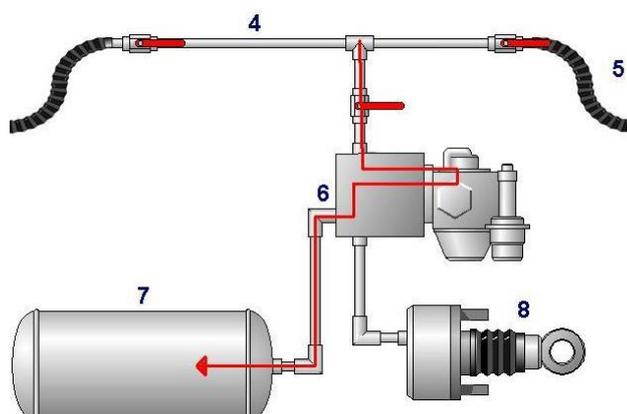
2.2 CONFIGURAÇÕES DAS VÁLVULAS DE CONTROLE

As configurações de funcionamento são acionadas conforme condição solicitada pelo maquinista ou por condição de emergência no trem, sendo elas carregamento, serviço, recobrimento, alívio e emergência.

2.2.1 CARREGAMENTO

O ar comprimido vindo do reservatório principal da locomotiva, abastecido pelo compressor, é direcionado para o encanamento geral, que em seguida passa pelo conjunto de válvulas de controle e é direcionado para o reservatório de ar combinado, como mostrado na figura 2.6.

Figura 2.6 - Fluxo de ar na configuração de carregamento



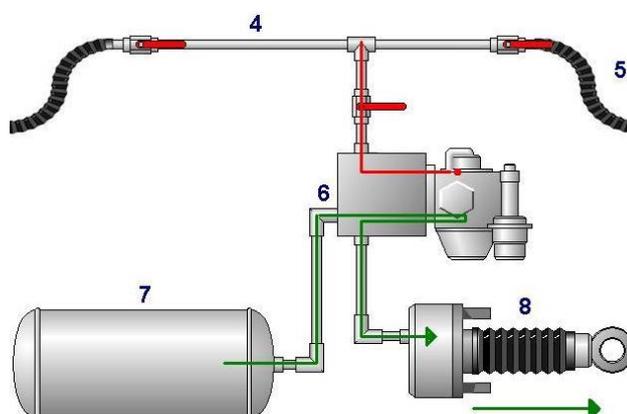
Fonte: SIEMTKOWSKI (2016).

Isto acontece até o equilíbrio das pressões entre encanamento geral e reservatório, mantendo o reservatório auxiliar disponível para acionamento dos freios, com pressão de 90 PSI (SIEMTKOWSKI, 2016).

2.2.2 SERVIÇO

A condição de serviço também pode ser entendida como a aplicação do freio no vagão. Ela acontece quando o maquinista provoca uma redução controlada na pressão do encanamento geral, fazendo com que ocorra um desequilíbrio entre a pressão do reservatório e a pressão do encanamento geral, como apresentado na figura 2.7.

Figura 2.7 - Fluxo de ar na configuração de serviço



Fonte: SIEMTKOWSKI (2016).

Com isso o conjunto de válvulas de controle direciona ar do reservatório para o cilindro de freio, até que a pressão do reservatório seja igualada à pressão do encanamento geral. Isto faz com que o cilindro movimente a timoneria de freio e aplique freio no vagão (SIEMTKOWSKI, 2016).

2.2.3 RECOBRIMENTO

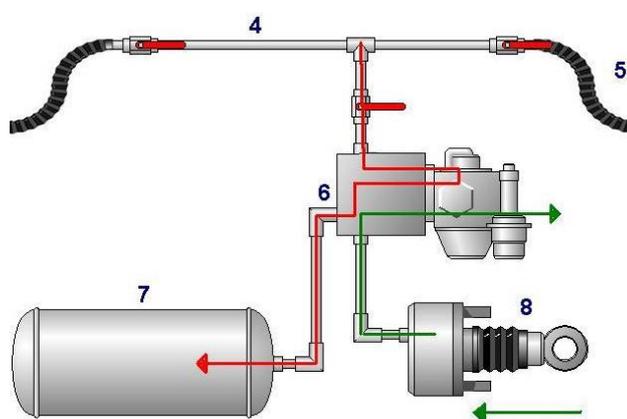
Quando a redução de pressão no encanamento geral cessa, tornando-se estável, o conjunto de válvulas de controle também cessará o envio de ar do reservatório auxiliar para o cilindro de freio, tão logo a pressão do reservatório se iguale à pressão do encanamento geral.

Neste momento, em que o conjunto de válvulas de controle interrompe o fluxo de ar do reservatório para o cilindro, o vagão permanece em condição de recobrimento, com o freio permanecendo aplicado (SILVA, *et al*, 2013)

2.2.4 ALÍVIO

Esta configuração acontece quando o maquinista comanda o reestabelecimento da pressão no encanamento geral. O aumento de pressão é percebido pelo conjunto de válvulas de controle, que verifica um desequilíbrio entre as pressões do encanamento geral e do reservatório auxiliar, como mostrado na figura 2.8.

Figura 2.8 - Fluxo de ar na configuração de alívio



Fonte: SIEMENTKOWSKI (2016).

Com isso, ocorre a liberação do ar do cilindro para a atmosfera, o afastamento das sapatas de freio e o direcionamento do ar do encanamento geral para o reservatório auxiliar, recarregando-o até se igualar com a pressão do encanamento geral (SIEMENTKOWSKI, 2016)

2.2.5 EMERGÊNCIA

A emergência pode ser aplicada tanto pelo maquinista quanto por uma condição de rompimento das mangueiras que ligam o encanamento geral. Ela acontece, pois, o ar do encanamento geral fluirá rapidamente para a atmosfera, e causará um desequilíbrio muito grande no conjunto de válvulas de controle.

Este gradiente brusco de pressão, fará com que o conjunto de válvulas de controle estabeleça uma comunicação do reservatório de emergência com o cilindro

de freio, até se estabelecer o equilíbrio de pressão entre estes dois volumes (SILVA, KINA e BERGANTINI, 2013)

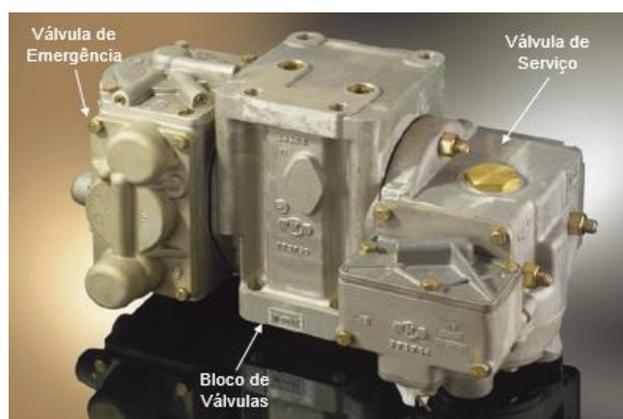
2.2.6 FUNÇÕES DO CONJUNTO DE VÁLVULAS DE CONTROLE

Como já dito, o conjunto de válvulas de controle é formado pela válvula de serviço, válvula de emergência e pelo suporte de encanamentos, também conhecido como bloco de válvulas.

Sendo responsável pela aplicação e alívio dos freios do vagão, além do carregamento do reservatório combinado, o conjunto é comandado pelo diferencial de pressão entre o encanamento geral e o reservatório de ar do vagão. Respondendo tanto por frenagens de redução de velocidade e parada, quanto por paradas de emergência em caso de fracionamento do trem ou comando do maquinista.

Nos vagões GDE utilizam-se conjuntos de válvulas tipo ABD, ABDX, DB-60 e DB-60-2, sendo o modelo DB-60 predominante na frota de vagões analisada e representado na figura 2.9.

Figura 2.9 - Conjunto de válvulas de controle modelo DB-60



Fonte: Adaptado de NYAB (2019).

Visto que o conjunto DB-60 representa a maior parcela da frota de válvulas analisada neste trabalho, ele será utilizado como base para apresentar todas as funções que as válvulas de controle modernas possuem, sendo apresentadas no quadro 4.1.

Quadro 2.1 - Funções do conjunto de válvulas de controle DB-60

Funções do conjunto de válvulas de controle DB-60	
<i>Válvula de Serviço</i>	<i>Válvula de Emergência</i>
Carregamento	Estabilidade de aplicação
Aplicação	Alívio acelerado após emergência
Alívio após serviço	Aplicação acelerada
Proteção contra emergência indesejada	Temporização do aumento da pressão do cilindro de freio
Estabilidade de aplicação	Aceleração da emergência
Alívio acelerado após serviço	Aumento da pressão do cilindro em aplicações de emergência
Limitadora de serviço rápido	Proteção contra alívio após emergência
Serviço rápido preliminar	
Alívio acelerado após emergência	
Alívio manual após serviço	
Alívio manual	
Drenagem dos reservatórios	
Drenagem da válvula de serviço	

Fonte: Adaptado de NYAB (1988).

Conhecendo as funções descritas na tabela 4.1, todas devem estar em pleno funcionamento, dentro dos parâmetros técnicos definidos pelo fabricante da válvula, a fim de se obter uniformidade na frenagem dos trens.

Estes parâmetros são verificados em testes realizados nas válvulas após a montagem de seus kits de reparo, em bancadas específicas para este fim, além do teste das válvulas instaladas no vagão, em um teste chamado teste de freio *single car*.

2.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado uma visão geral sobre o sistema de freio pneumático de pressão positiva, sendo destacadas as 5 configurações de frenagem, bem como as funções internas do conjunto de válvulas de controle, que precisam funcionar dentro de parâmetros técnicos definidos pelo fabricante, com objetivo de manter a uniformidade de frenagem dos trens.

A apresentação deste conteúdo é importante para se esclarecer quais os mecanismos de acionamento do freio, bem como das válvulas de controle, permitindo entender como a perda destas funções impossibilita a permanência da válvula no vagão e demanda sua substituição de maneira corretiva.

No capítulo 3 serão abordados os conceitos gerais de confiabilidade, as métricas envolvidas e uma visão sobre análise de dados de vida. Em seguida serão apresentadas as principais distribuições estatísticas utilizadas em análises de confiabilidade, bem como suas principais características e parâmetros.

3 CONFIABILIDADE E ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

Segundo Lemes (2006),

A análise dos dados de vida de um equipamento ou sistema pode ser realizada através da função confiabilidade, função taxa de falha e ainda através dos valores de vida média e vida mediana. Todas essas funções e valores podem ser determinadas diretamente a partir de uma aproximação, utilizando a distribuição adequada, da função de probabilidade de falha $F(t)$.

Sabendo disto, vale apresentar um breve resumo dos conceitos de confiabilidade e análise de dados de vida.

3.1 CONFIABILIDADE

Confiabilidade é definida na NBR 5462 (ABNT, 1994) como: Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. Sendo que esta função pode ser primária ou secundária (MAZZEI, 2018).

A confiabilidade pode também ser entendida como uma probabilidade, o que permite que em seu cálculo sejam utilizados axiomas clássicos de probabilidade (LIMA, 2014).

As métricas estatísticas se dão em função do:

- Tempo de uso ou operação;
- Condições determinadas de uso.

Sendo que os estudos necessitam de dados ou registros, modelos matemáticos e a utilizando de gráficos para visualização dos comportamentos dos dados em função do modelo selecionado (MAZZEI, 2018).

3.2 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

Para Lemes (2006) a definição e descrição de cada parâmetro particular que define uma função, são estimados a partir de dados de falha obtidos em observações experimentais.

Complementando, Mazzei (2018) pontua que na engenharia da confiabilidade e em análise de dados de vida, os resultados são baseados em estimativas, trazidas de modelos matemáticos.

Estas funções matemáticas são alimentadas com dados de origens diversas, sendo:

- Testes de campo de protótipos;
- Retornos de garantia;
- Ordens de manutenção;
- Notas de manutenção.

Sendo o real valor da confiabilidade conhecido de maneira exata somente após toda a população analisada ter falhado, a análise de dados de vida tem como objetivo a previsão precisa deste valor.

Para Santos (2016), possuir as informações de censura e tempos de falha, é fator fundamental para realização de uma análise de confiabilidade, sendo que o tempo de início do estudo deve ser bem definido, o que permite uma comparação entre os indivíduos na origem do estudo.

Assim, com uma amostra de dados em mãos, pode-se distribuí-la por meio da função densidade de probabilidade de falha, ($f(x)$), também conhecida como pdf, e da função de probabilidades acumuladas de falha, ($F(x)$), ou cdf. Ambas descrevem a distribuição das probabilidades de uma variável aleatória.

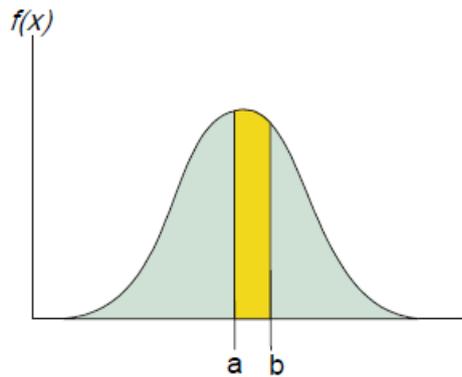
Considerando x uma variável aleatória que assume o valor do tempo até a ocorrência da falha do componente, entende-se que x pode assumir valores de 0 até infinito (MAZZEI, 2018).

As variáveis aleatórias podem ser classificadas como discretas ou contínuas, quando assumem somente um conjunto enumerável (finito ou infinito) ou quando assumem valores em qualquer intervalo dos números reais, respectivamente (MAYER, 2016).

Assumindo x como uma variável aleatória contínua, a pdf é a função $f(x)$ para dois valores, a e b , sendo $a < b$, como representado na equação 3.1 e na figura 3.1. Desta forma, a área compreendida pela função densidade entre, a e b é a provabilidade de x possuir um valor neste intervalo (MAZZEI, 2018).

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x) dx \quad (3.1)$$

Figura 3.1 - Função densidade de probabilidade para uma variável aleatória contínua



Fonte: MAZZEI (2018).

Como citado por Mazzei (2018), “Para obter a probabilidade acumulada a partir da pdf, é necessário calcular a área debaixo da curva. Assim, a função distribuição acumulada, cdf, fornece a probabilidade acumulada diretamente a até o x desejado”.

A cdf é a função $F(x)$ de uma variável aleatória x , definida na equação 3.2. Sendo que para uma variável aleatória x , $F(a)$ é a probabilidade de que o valor observado x seja no máximo a .

$$F(a) = P(x \leq a) = \int_{-\infty}^a f(x) dx \quad (3.2)$$

A relação matemática entre pdf e cdf é apresentada na equação 3.4.

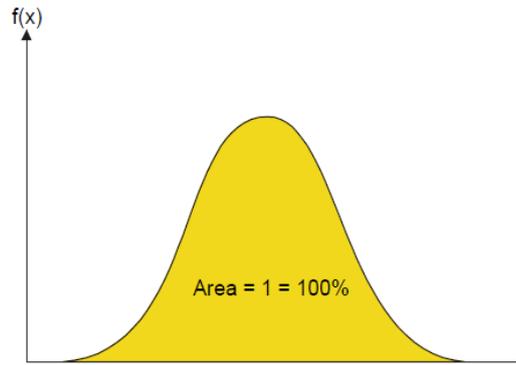
$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(s) \quad (3.3)$$

$$f(x) = \frac{d(F(x))}{dx} \quad (3.4)$$

Diz Mazzei (2018) que, a cdf é a área formada pela função densidade de probabilidade, até um valor s desejado. Ou seja, a área completa abaixo da pdf é sempre igual a 1, como mostrado na equação 3.5 e na figura 3.2.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (3.5)$$

Figura 3.2 - Área abaixo da pdf



Fonte: MAZZEI (2018).

Entendido o conceito de probabilidade de falha, apresenta-se a confiabilidade como a probabilidade de não se observar falha em um intervalo de tempo t . O tempo é fator indissociável na especificação da confiabilidade, ou seja, não se pode mencionar um valor de confiabilidade sem informar em quanto tempo, como mostrado na equação 3.11 (MAZZEI, 2018)

$$F(t) = Q(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (3.6)$$

$$Q(t) + R(t) = 1 \quad (3.7)$$

$$R(t) = 1 - Q(t) \quad (3.8)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(s)ds \quad (3.9)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(s)ds \quad (3.10)$$

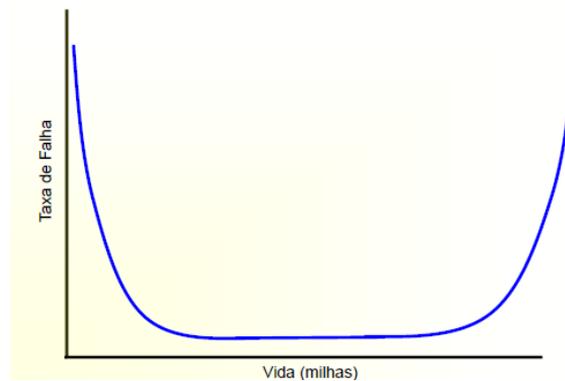
$$f(t) = -\frac{d(R(t))}{dt} \quad (3.11)$$

Outro conceito importante a se observar é a função taxa de falhas por unidade de tempo, que significa, a probabilidade do item falhar na próxima e menor unidade de tempo e dado que funcionou até então.

A taxa de falhas é expressa em falhas por unidade de tempo, ciclos, distância, etc. A figura 3.3 apresenta uma representação gráfica da taxa de falhas, também conhecida como curva da banheira (LEMES, 2006).

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.12)$$

Figura 3.3 - Curva da banheira idealizada



Fonte: MAZZEI (2018).

Por fim, outros dois conceitos que suportam as análises de confiabilidade são a função vida média e a vida mediana.

A função vida média calcula a medida do tempo médio de operação até a uma falha ocorrer, como mostrado na equação 3.13. Ela trata do tempo esperado, ou médio até a falha, ou seja, o tempo médio até a falha (MTTF), que difere do conceito de tempo médio entre falhas (MTBF). A vida média é uma medida básica de confiabilidade, referindo-se a uma população de itens reparáveis (LIMA, 2014).

$$T = m = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (3.13)$$

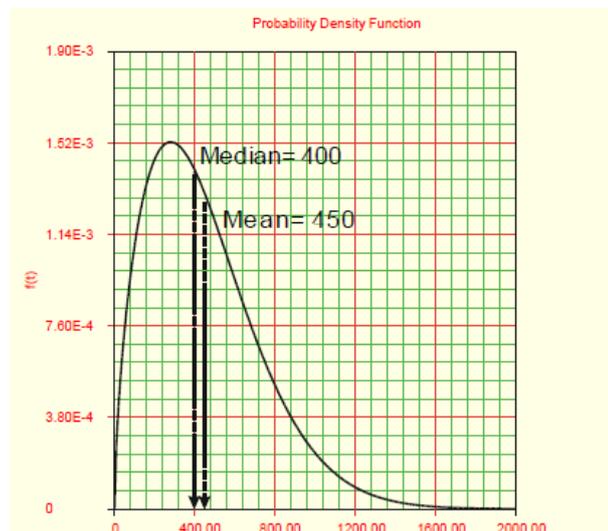
Já a vida mediana, T , é o valor de variável aleatória que divide a pdf exatamente pela metade, deixando tanto para o lado esquerdo quanto para o direito a metade da área, ou seja, sendo obtida pela equação 3.14.

$$\int_{-\infty}^T f(t)dt = 0,5 \quad (3.14)$$

Conhecido este conceito de vida mediana, vale ressaltar algumas observações sobre este valor, em função da distribuição de probabilidades escolhida (MAZZEI, 2018).

- Em distribuições simétricas a vida média é igual a vida mediana.
- Para distribuições assimétricas, a média pode variar, podendo ser maior ou menor que a mediana, conforme mostrado na figura 3.4.

Figura 3.4 - Posicionamento da média e da mediana em uma pdf assimétrica.



Fonte: MAZZEI (2018).

- Na distribuição exponencial a vida média sempre corresponderá a uma porção de 0,632 do total a partir do 0 ou o “tempo” em que 63,2% das unidades falharão.
- Para a distribuição Weibull, não há valor fixo. Esta porção é função dos parâmetros do modelo (MAZZEI, 2018).

Para Lemes (2006), “A análise de dados é uma ferramenta crucial no estudo da confiabilidade”. Sendo que uma classificação correta dos registros obtidos é necessária para um adequado estudo de confiabilidade e análises posteriores.

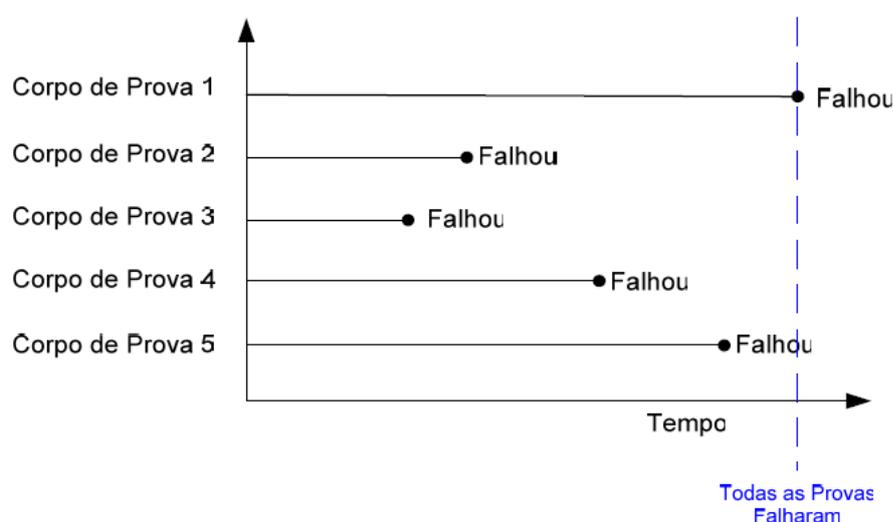
Já para Mazzei (2018), o tipo de dado afeta a estimativa da confiabilidade, sendo que cada tipo de dado terá um tratamento especial. Sabendo disso, vale

apresentar breve explanação sobre a classificação dos tipos de dados em análises de confiabilidade.

3.2.1 DADOS COMPLETOS

Segundo Lemes (2006), dados completos são dados que representam a total degradação ou a falha dos equipamentos observados, sendo que ao final seu tempo até a falha é conhecido. Uma representação esquemática de um dado completo é mostrada na figura 3.5.

Figura 3.5 - Representação esquemática de um dado completo



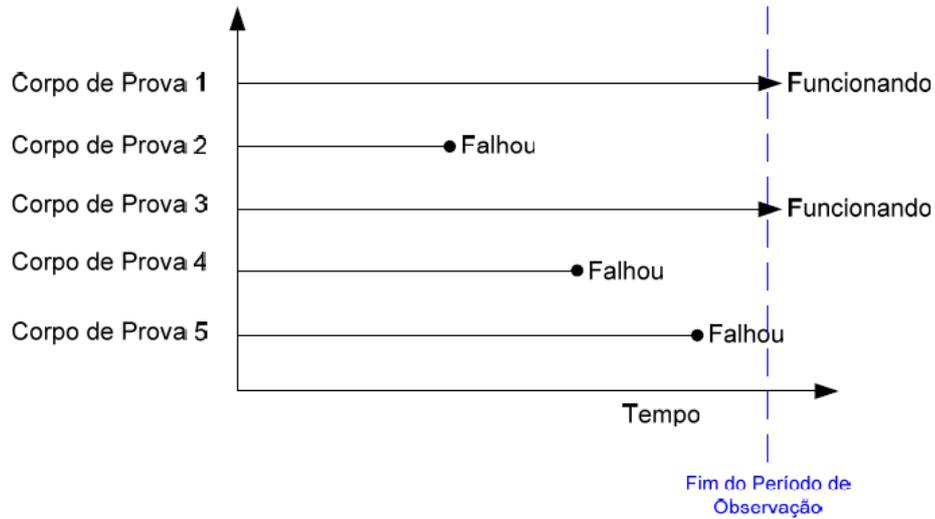
Fonte: LEMES (2006).

Reiterando, Silva (2016) afirma que “se o teste se desenvolver de maneira que venha a fornecer o tempo de falha de todas as unidades, o conjunto dos dados de tempo de falha obtido é dito completo.”.

3.2.2 DADOS SUSPENSOS

Dados suspensos, também conhecidos como censurados a direita, são obtidos quando ao fim do período de observação, ainda existem equipamentos que não falharam, como explicado por LEMES (2006).

Figura 3.6 - Representação esquemática de dados suspensos



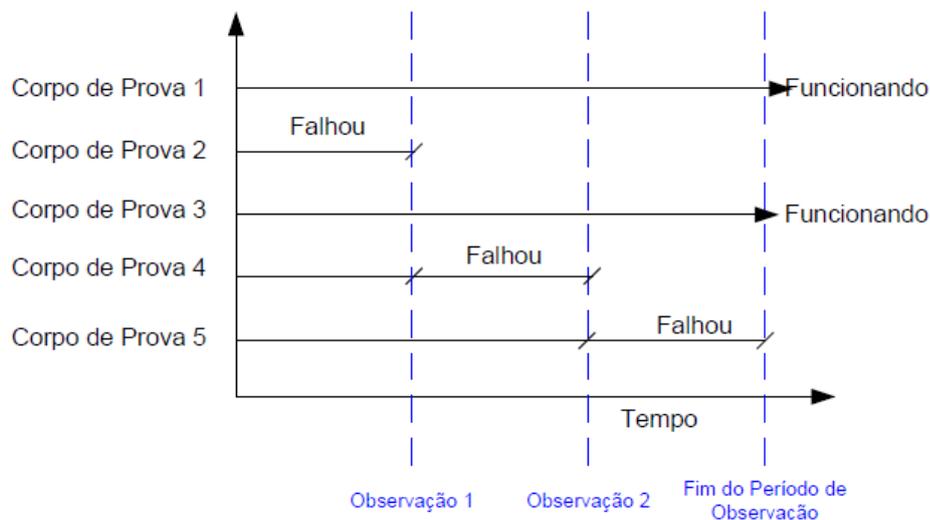
Fonte: LEMES (2006).

São um tipo de dado muito comum em dados de garantia ou em observações de campo, uma vez que ao fim do período de coleta de dados, nem todos os equipamentos apresentaram falhas, ou seja, equipamentos funcionando em perfeito estado. Estes dados devem fazer parte e contribuem para as análises de confiabilidade. (MAZZEI, 2018)

3.2.3 DADOS AGRUPADOS

Dados agrupados ou censurados em intervalo são observados quando a coleta de dados é feita periodicamente, em intervalos de tempo pré-definidos e o equipamento analisado apresentou falha entre duas destas observações, no entanto não se sabe exatamente o momento em que ocorreu a falha, sabendo-se somente o intervalo entre duas inspeções (LEMES, 2006).

Figura 3.7 - Representação esquemática de dados agrupados



Fonte: LEMES (2006).

Mazzei (2018) diz que os dados são classificados como em intervalo quando o período de observação for maior do que o período requerido para o resultado. E exemplifica, se o resultado for obtido em meses e os dados também estiverem em meses, teremos então uma amostra de dados completos, no entanto, se o resultado foi em dias e os dados em meses, consideraremos uma amostra de dados em intervalo.

3.3 MODELOS ESTATÍSTICOS

Para Lemes (2006), existem “alguns modelos de distribuição estatística que podem ser utilizados para modelar matematicamente o comportamento da função de probabilidade, $F(t)$ ”.

Também conhecidos como modelos probabilísticos, Silva (2016) diz que “são baseados na suposição de uma distribuição de probabilidade para o tempo de confiabilidade por meio dos parâmetros estimados das amostras em estudo.”.

“Cada distribuição possui alguns parâmetros particulares que a descreve e a define, esses parâmetros são estimados a partir dos dados de falha obtidos em observações experimentais.” (LEMES, 2006)

Nelson (1982 apud LEMES, 2006), diz que as distribuições mais comuns para se representar a probabilidade de falha de componentes e sistemas são,

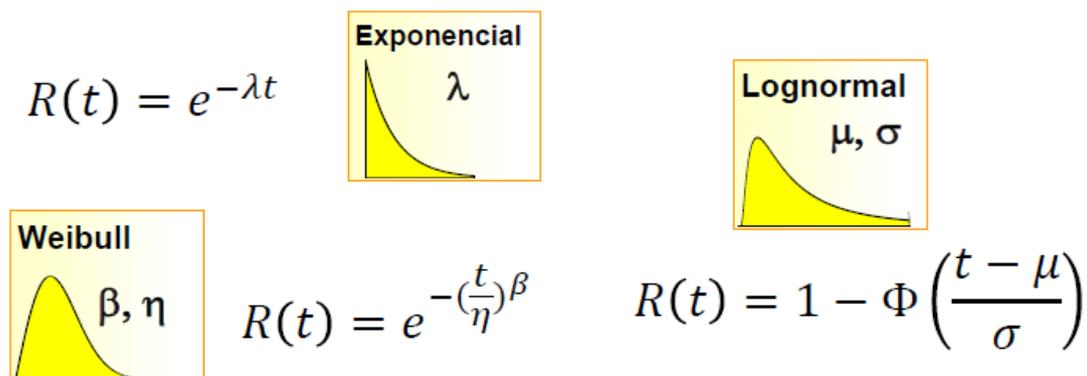
Normal, Exponencial, Lognormal e Weibull, reiterado por Santos (2016) que diz que estas distribuições possuem destaque na análise estatística de dados de confiabilidade, por suas comprovadas adequações a várias situações práticas.

Já para Mazzei (2018),

Os modelos estimam a taxa de falha do produto em função do tempo, bem como a probabilidade de falha (ou a sobrevivência) do produto para um intervalo de tempo de uso qualquer.

Os modelos são funções matemáticas contínuas que permitem tanto a interpolação, quanto a extrapolação das estimativas. Em confiabilidade, tais modelos são também denominados de distribuições estatísticas de confiabilidade ou ainda “distribuições de vida”.

Figura 3.8 - Representações gráficas e matemáticas de diversas distribuições estatísticas



Fonte: MAZZEI (2018).

Resumindo, para Lima (2014), pode-se usar a confiabilidade como uma probabilidade, então associada a esta tem-se uma função densidade de probabilidade $f(t)$, uma função de confiabilidade $R(t)$ e a função de risco $h(t)$.

Será explanada a utilização dessas funções no contexto da gestão da manutenção.

3.3.1 DISTRIBUIÇÃO NORMAL

Utilizada principalmente em análises de engenharia de qualidade, também possui utilização em engenharia de confiabilidade, modelando confiabilidade de equipamentos com taxa de falha crescente, ou seja, equipamentos com características de envelhecimento ou desgaste de componentes (LEMES, 2006).

A equação 3.15, expressa a função densidade de probabilidade.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t - \mu_t}{\sigma_t} \right)^2} \quad (3.15)$$

Dois parâmetros caracterizam a função, o desvio padrão, σ_1 e a média da população, μ_1 .

3.3.2 DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL

Para Fogliatto e Ribeiro (2009 apud LIMA, 2014), esta distribuição é de fundamental importância na análise da confiabilidade por ser a única que tem aspecto contínuo da função de risco.

Cita Lemes (2006) que é comumente utilizada para representar a probabilidade de falha de equipamentos eletrônicos, representando o tempo de vida útil do equipamento, com taxa de falha constante.

A pdf da distribuição exponencial é definida conforme mostrado na equação 3.16.

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (3.16)$$

Os dois parâmetros que caracterizam esta função são t , que é a variável aleatória que representa o tempo e λ que é o parâmetro de distribuição.

3.3.3 DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL

De acordo com Nelson (1982 apud LEMES, 2006), a distribuição Lognormal é utilizada na análise de confiabilidade em ciclos até a falha por fadiga, resistência dos materiais e no projeto probabilístico com cargas variáveis.

Para Fogliatto e Ribeiro (2009 apud LIMA, 2014) é uma distribuição limitada à esquerda, muito utilizada na modelagem de tempos até reparo em unidade reparáveis.

A função densidade de probabilidade para esta distribuição é escrita na equação 3.17.

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot \sigma'_t \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t - \mu'_t}{\sigma'_t} \right)^2} \quad (3.17)$$

Os parâmetros que definem esta função são σ'_t e μ'_t , que representam a mediana da população e pode assumir qualquer valor, e o desvio padrão no domínio logarítmico e só pode assumir valores positivos, respectivamente. (LEMES, 2006).

3.3.4 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Lemes (2006), destaca que Weibull é uma distribuição bastante flexível e pode representar todas as regiões da curva da banheira, ela se faz presente quando se tem uma função de risco constante, crescente ou decrescente, esta característica lhe confere ampla utilização estudos de confiabilidade, uma vez que possui boa capacidade de representar componentes até a falha, mesmo com comportamentos de falha diferentes.

Sua função densidade de probabilidade é representada na equação 3.18.

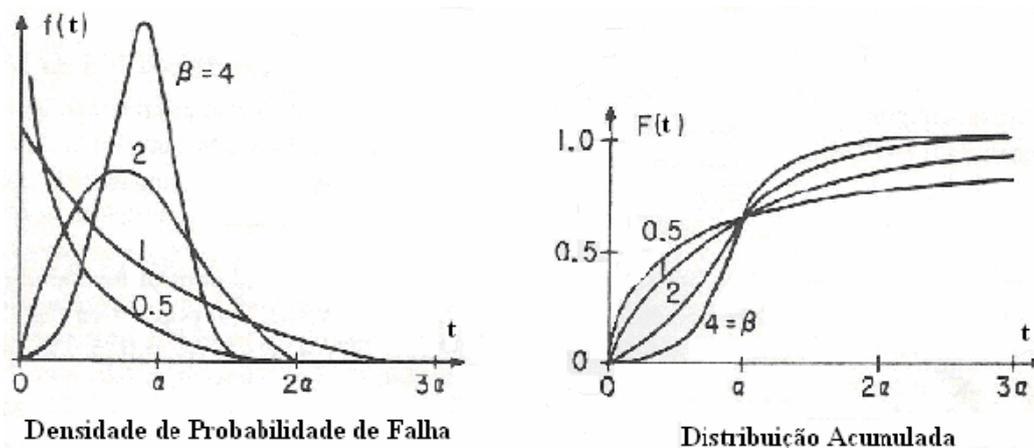
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1} \cdot e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (3.18)$$

Diz O'Connor (2002 apud LEMES, 2006) que

Esta distribuição pode assumir até 3 parâmetros, η , β , γ . Sendo que η representa a constante de escala ou vida característica do equipamento, definindo a probabilidade de 62,3% dos equipamentos analisados apresentarem falha. Já β , é a constante de forma ou inclinação da distribuição, é o parâmetro que define o formato da curva que caracteriza a densidade de probabilidade de falha. E γ , é o parâmetro de localização, que determina a vida mínima, ou seja, o intervalo de tempo mínimo em que o equipamento não apresentará falha, podendo ser nulo, o que indica uma distribuição de dois parâmetros.

A figura 3.9 apresenta as curvas da pdf e da cdf para a distribuição Weibull.

Figura 3.9 - pdf e cdf para distribuição Weibull



Fonte: LEMES (2006).

Lemes (2006) conclui,

É importante notar que quando $\beta = 1$ a distribuição se torna idêntica à distribuição Exponencial, representando o período de vida útil do produto, em que a taxa de falhas do mesmo é constante, quando $\beta = 2$, a distribuição se aproxima da lognormal e, quando $\beta = 4$, a distribuição se aproxima da distribuição normal, mostrando a flexibilidade da distribuição de Weibull, Nelson (1982).

Os resultados mostram que, para $\beta < 1$, a distribuição representa bem a infância dos componentes, para $\beta = 1$, a distribuição refere-se a vida útil do produto e para $\beta > 1$, a distribuição trata do envelhecimento ou fase de degradação do produto.

3.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O capítulo apresentou as principais métricas de confiabilidade e análise de dados de vida, reforçando o conceito e a importância nas análises de confiabilidade de métricas como confiabilidade, taxa de falha, vida média e vida mediana.

Também foi apresentado o conceito de classificação de dados, separando-os em completos, suspensos e agrupados, destacando a importância do entendimento da característica de cada dado e sua correta classificação.

O capítulo tem importância, uma vez que fornece todo o subsídio teórico para organização e interpretação dos dados que serão apresentados no próximo capítulo. Permitindo crítica e interpretação sobre os valores apresentados no software de análise de confiabilidade.

No capítulo 4, serão apresentados os dados coletados no sistema informatizado de manutenção, sua classificação e sua aderência às distribuições de estatísticas. Os parâmetros da distribuição serão discutidos e avaliados, analisando-se a confiabilidade, comparando o resultado para a missão atual do plano preventivo e o objetivo de confiabilidade definido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foram avaliadas as válvulas instaladas em 12650 vagões, sendo que estes circulam na configuração dual, ou seja, um conjunto de válvulas de controle comanda as funções de frenagem de 2 vagões simultaneamente, ou seja, a população total de válvulas avaliadas foi de 6325 conjuntos de válvulas de controle.

Como já exposto no capítulo 2, um conjunto de válvula de controle é composto por uma válvula de serviço e uma válvula de emergência, que trabalham simultaneamente, com algumas funções exclusivas e outras compartilhadas entre si. Desta forma, a população total deste estudo foi de 6325 válvulas de serviço e 6325 válvulas de emergência.

Nesta população estudada estão presentes 3 modelos de válvulas, com proporção mostrada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Proporção das válvulas de controle

Tipo de válvula de controle	Proporção na frota
DB60 (serviço e emergência)	60%
ABD (serviço e emergência)	30%
ABDX (serviço e emergência)	10%

Fonte: O Autor, (2019)

Estes 3 modelos de válvulas possuem pequenas diferenças internas, tais como, tempo de resposta à aplicação e alívio e princípios de funcionamento. Mesmo com estas diferenças, não foram observados comportamentos diferentes nas análises, uma vez que os testes de aderência apresentados neste capítulo não verificaram aderência à uma distribuição multiparamétrica.

Os dados analisados foram extraídos do sistema informatizado de manutenção (SAP), por meio de ordens de manutenção preventiva e notas de manutenção de troca de válvula de serviço e troca de válvula de emergência.

Considerando que em todos os planos preventivos de 75 meses são colocadas válvulas com kits de reparo novos, ou seja, em início de vida, as ordens de manutenção dos planos preventivos foram consideradas como t_0 na vida de cada válvula analisada.

A partir desta data, foram avaliadas todas as notas de manutenção com classificação de troca de válvula de serviço e válvula de emergência. Estas notas têm basicamente 4 origens:

- Manutenção corretiva após inspeções nos pátios;
- Manutenção corretiva após inspeção em oficina;
- Manutenção preventiva quando a válvula ultrapassou 75 meses em operação (independente do plano);
- Manutenção preventiva periódica de 75 meses.

Para estes 4 casos foi utilizada a classificação dos dados, mostrada na tabela 4.2.

Quadro 4.1 - Classificação dos dados oriundos das notas de manutenção

Tipo de manutenção	Classificação do dado
Manutenção corretiva após inspeção de pátio	Dado completo
Manutenção corretiva após inspeção em oficina	Dado completo
Manutenção preventiva de válvulas com mais de 75 meses (independente do plano)	Dado suspenso
Plano de manutenção preventivo	Dado suspenso

Fonte: O Autor, (2019)

Uma vez que os planos de manutenção foram definidos com periodicidade mensal e o período de vida das válvulas atinge algumas dezenas de meses, definiu-se como unidade de tempo base para análise o mês.

Tendo esta classificação definida, no apêndice A é apresentada a classificação dos dados relacionados a válvulas de serviço e no apêndice B a classificação dos dados relacionados à válvula de emergência.

A tabela 4.2 resume o volume de dados analisados.

Tabela 4.2 - Classificação geral dos dados analisados.

Válvula	Dados Completos	Dados Suspensos
Válvulas de Serviço	501	12367
Válvulas de Emergência	189	11985

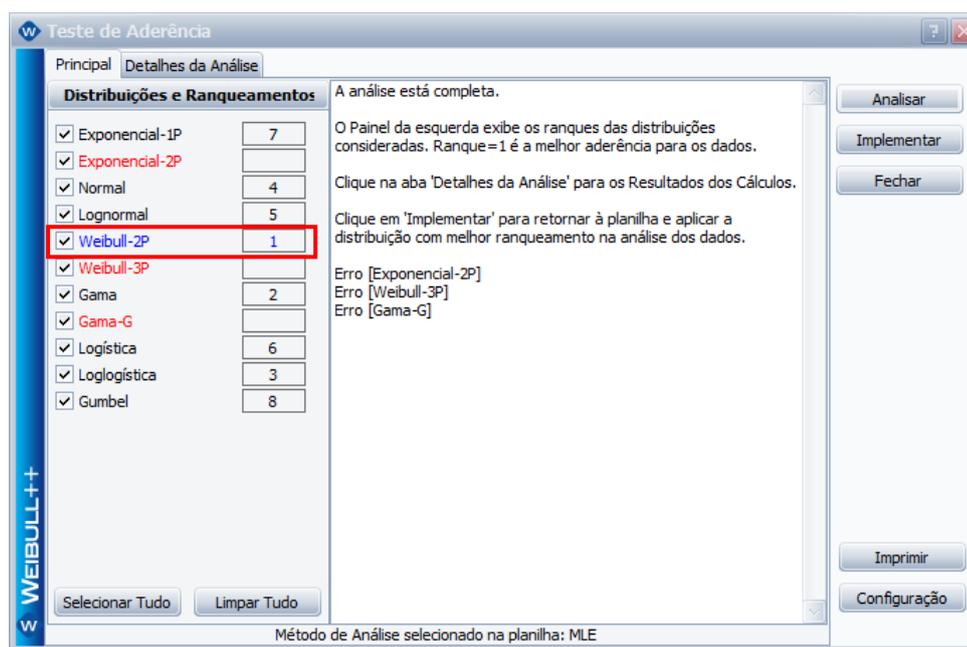
Fonte: O Autor, (2019)

Com os dados já classificados, foi utilizado o software Weibull++ 11 para realização das análises, cálculos e geração dos gráficos.

Em primeiro lugar verificou-se a aderência dos dados aos modelos matemáticos disponíveis utilizando o Teste de Aderência do software.

A figura 4.1, mostra os resultados para os dados relacionados às válvulas de serviço, onde foi verificada uma melhor aderência à distribuição Weibull-2P (Weibull 2 parâmetros).

Figura 4.1 - Teste de aderência para válvulas de serviço



Fonte: O Autor, (2019)

Esta constatação se confirma ao comparar os valores de LKV, ou seja, valor da função de verossimilhança, do inglês, *likelihood value*, mostrado na figura 4.2.

Este valor indica o grau de ajuste dos dados à cada um dos modelos, sendo que quanto maior for seu valor, mais o grau de ajuste dos dados.

Figura 4.2 - Tabela de dados do Testes de Aderência de válvulas de serviço

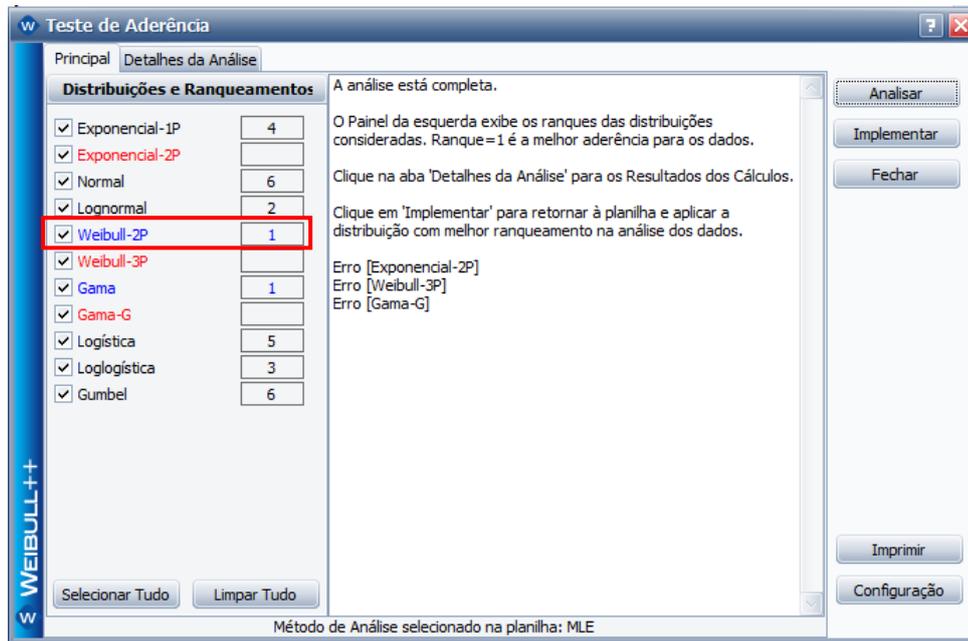
	Distribuição	AVGOF	AVPLOT	LKV
1	Exponencial-1P	0,000659767	1,046417013	-3957,63586
2	Exponencial-2P	Descartar	Descartar	Descartar
3	Normal	9,99978E-11	0,318060074	-3984,47377
4	Lognormal	1,00948E-05	0,911592873	-3956,973469
5	Weibull-2P	8,59766E-08	0,694634949	-3926,984177
6	Weibull-3P	Descartar	Descartar	Descartar
7	Gama	9,99978E-11	0,724123002	-3929,450777
8	Gama-G	Descartar	Descartar	Descartar
9	Logística	4,99113E-07	0,346834584	-4008,096457
10	Loglogística	9,99978E-11	0,711744373	-3929,592996
11	Gumbel	7,00992E-07	0,375808534	-4011,485648

Fonte: O Autor, (2019)

Da mesma forma, com os dados referentes às válvulas de emergência, verificou-se por meio do teste de aderência a distribuição estatística mais adequada para representar o conjunto de dados.

Como constatado nas válvulas de serviço a distribuição que melhor se adequou foi a Weibull-2P, como mostrado na figura 4.3.

Figura 4.3 - Teste de aderência para válvulas de emergência



Fonte: O Autor, (2019)

Ao se analisar os valores de LKV, pode-se confirmar que para a função Weibull-2P tem-se um melhor ajuste dos dados, uma vez que o valor de LKV para esta função foi o maior, como mostrado na figura 4.4.

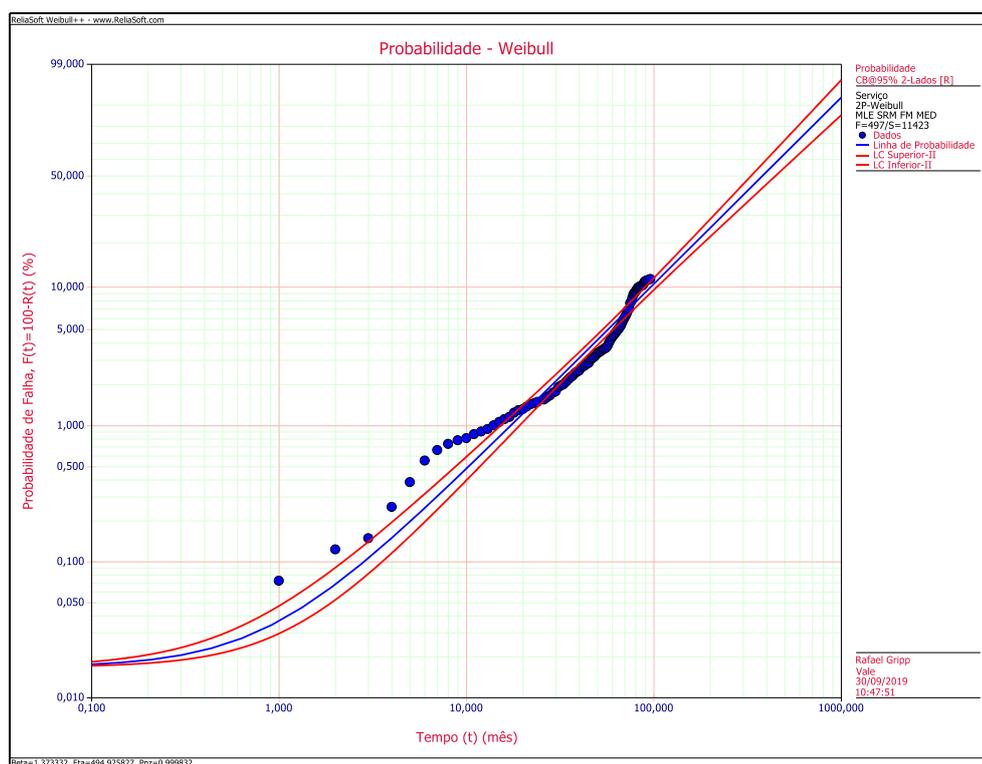
Figura 4.4 - Tabela de dados do Testes de Aderência de válvulas de serviço

Distribuição	AVGOF	AVPLOT	LKV
1 Exponencial-1P	1,70957E-07	0,355710655	-1680,278767
2 Exponencial-2P	Descartar	Descartar	Descartar
3 Normal	3,14929E-07	0,216013466	-1688,425923
4 Lognormal	9,99978E-11	0,181702076	-1663,890154
5 Weibull-2P	2,76007E-07	0,127994452	-1658,016798
6 Weibull-3P	Descartar	Descartar	Descartar
7 Gama	9,99978E-11	0,132259945	-1658,2353
8 Gama-G	Descartar	Descartar	Descartar
9 Logística	9,99978E-11	0,267909675	-1700,399793
10 Loglogística	2,83918E-07	0,128641861	-1658,051628
11 Gumbel	1,77107E-07	0,274572575	-1701,177225

Fonte: O Autor, (2019)

Esta aderência para as válvulas de serviço pode ser observada graficamente, no gráfico da cdf, mostrados na figura 4.5. Os pontos em azul são referentes aos dados reais e as linhas vermelhas representam os limites de confiança. Pode-se observar que na região de maior densidade dos dados, os pontos reais estão muito próximos dos limites de confiança.

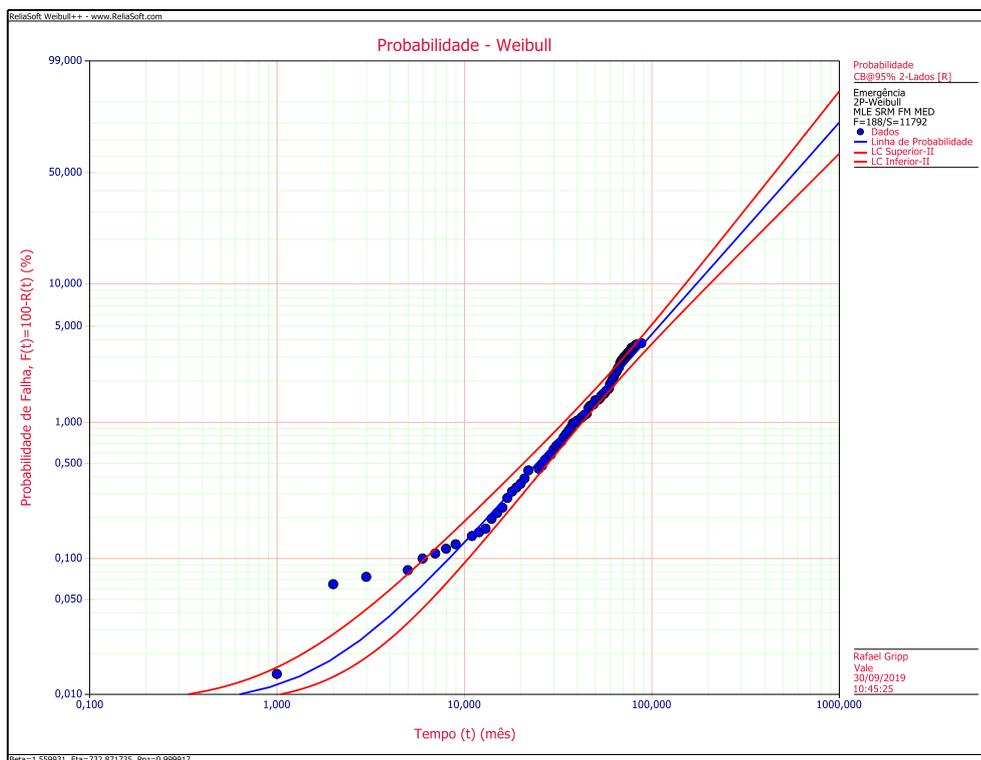
Figura 4.5 - Gráfico da cdf para válvulas de serviço



Fonte: O Autor, (2019)

Já na figura 4.6, é apresentada a aderência dos dados à cdf para válvula de emergência. Observa-se que os dados reais em azul, estão em sua maioria localizados entre os limites de confiança, representados pelas linhas vermelhas.

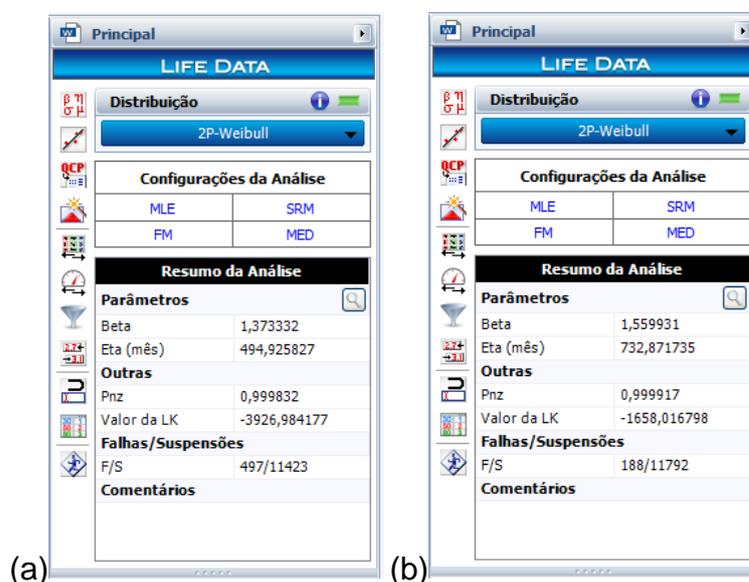
Figura 4.6 - Gráfico da cdf para válvulas de emergência



Fonte: O Autor, (2019)

Com a distribuição mais adequada escolhida, cabe analisar os parâmetros da distribuição, figura 4.7 mostra os valores dos parâmetros da distribuição Weibull apresentados pelo software.

Figura 4.7 - Identificação dos parâmetros para conjunto de válvulas de controle (a) válvulas de serviço e (b) válvulas de emergência.



Fonte: O Autor, (2019)

Na tabela 4.3 contém a consolidação dos dados.

Tabela 4.3 - Consolidação dos parâmetros para função Weibull-2P

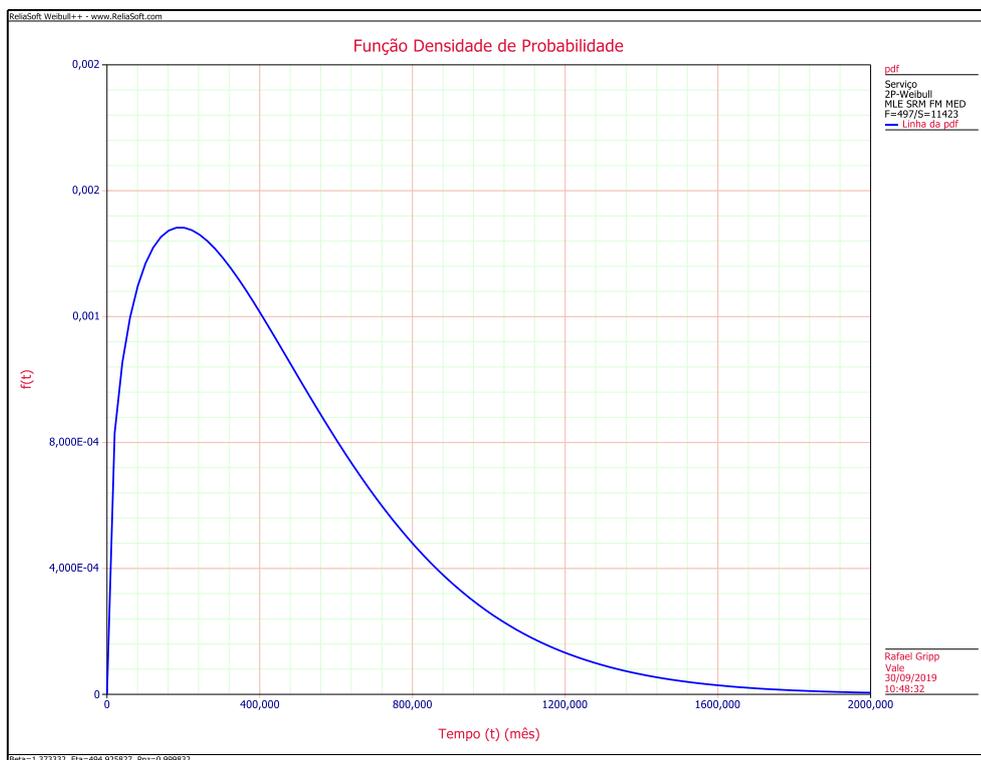
Parâmetro	Válvula de Serviço	Válvula de Emergência
η	494,925827	732,871735
β	1,373332	1,559931
γ	0	0

Fonte: O Autor, (2019)

O primeiro parâmetro da distribuição Weibull a ser avaliado é γ , ou o parâmetro de localização. Uma vez que a distribuição escolhida foi a weibull-2P, este parâmetro passa a ser nulo, indicando que para ambas as válvulas estudadas não há uma vida mínima, ou seja, um período mínimo em que as válvulas não apresentarão falha.

Com isso, o segundo parâmetro a ser avaliado é η , uma vez que seu valor se apresentou bastante elevado, espera-se uma pdf “achatada”, ou seja, com uma base bastante ampla, distribuída ao longo dos meses e um pico baixo, mostrando pouca concentração dos dados em um ponto da curva. Isto pode ser observado na figura 4.8, onde é apresentada a curva pdf, para válvulas de serviço.

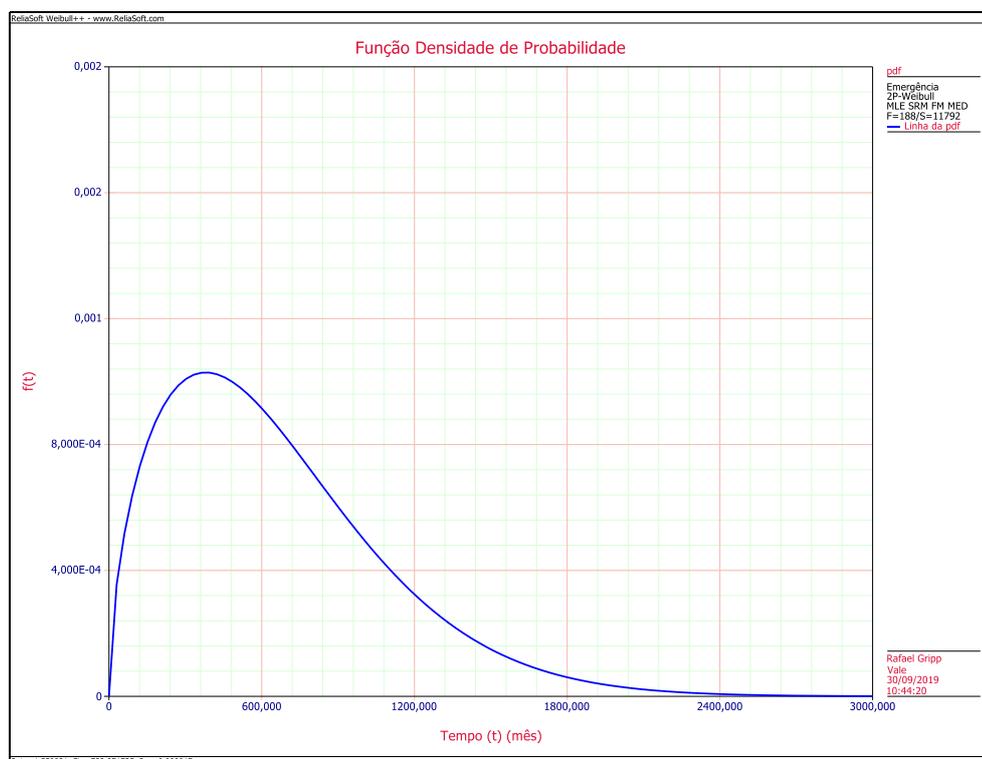
Figura 4.8 - Gráfico da pdf para válvulas de serviço



Fonte: O Autor, (2019)

Como observado para as válvulas de serviço, nas válvulas de emergência o comportamento de uma pdf de base ampla e região central foi observado, uma vez que seu valor de η é maior que para válvulas de serviço, como observado na figura 4.9.

Figura 4.9 - Gráfico da pdf para válvulas de emergência



Fonte: O Autor, (2019)

Por fim, cabe avaliar o parâmetro β , que é o parâmetro de forma da distribuição. Ele indica que com a proximidade do valor 1, para ambas as válvulas analisadas, as distribuições assumem características à uma distribuição exponencial.

Com os valores de 1,37 para válvulas de serviço e 1,56 para válvulas de emergência, observa-se que a distribuição denota um envelhecimento ou degradação do equipamento analisado.

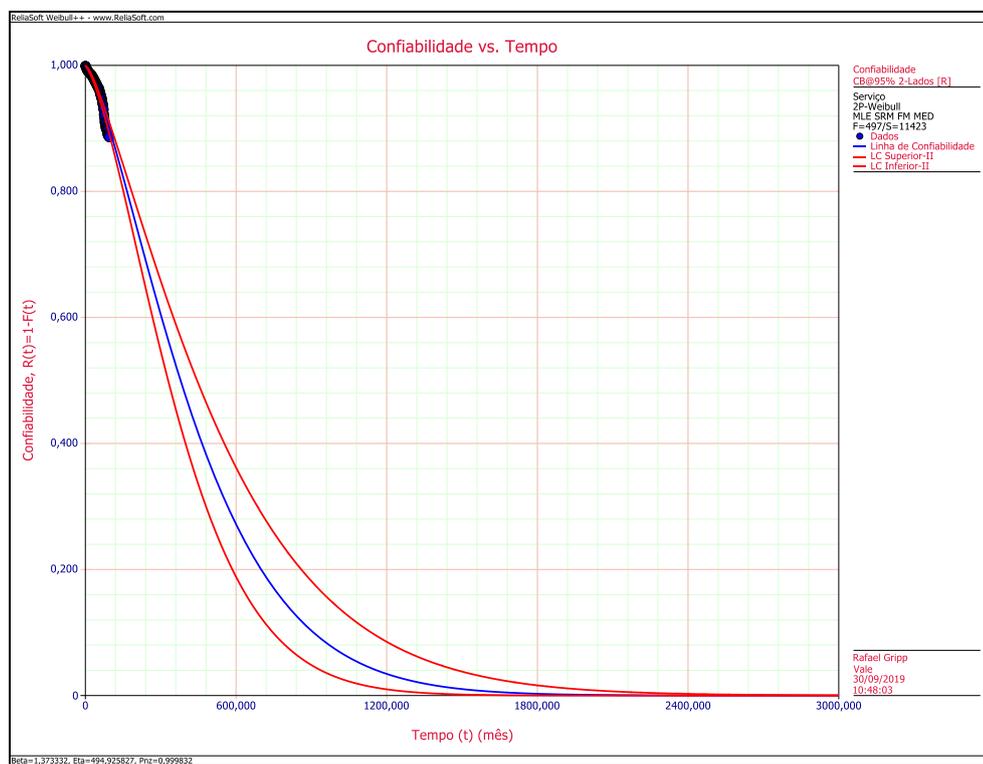
Isto se confirma em campo, uma vez que o processo de degradação ou envelhecimento das borrachas e desgastes internos são causas frequentes de perda das funções do conjunto de válvulas de controle.

Com os valores dos parâmetros da distribuição e comportamento dos dados interpretados, uma análise da confiabilidade é válida para definição do valor de referência de estudo.

Primeiramente, conhecendo a periodicidade do plano de manutenção preventiva atual, que é de 75 meses, verificou-se qual a confiabilidade observada para cada tipo de válvula.

A figura 4.10 apresenta o gráfico da confiabilidade ao longo do tempo para válvulas de serviço.

Figura 4.10 - Confiabilidade vs. Tempo para válvulas de serviço



Fonte: O Autor, (2019)

Para a frequência de manutenção do plano preventivo de freio, a confiabilidade é mostrada ao fim do período de 75 meses, na figura 4.11.

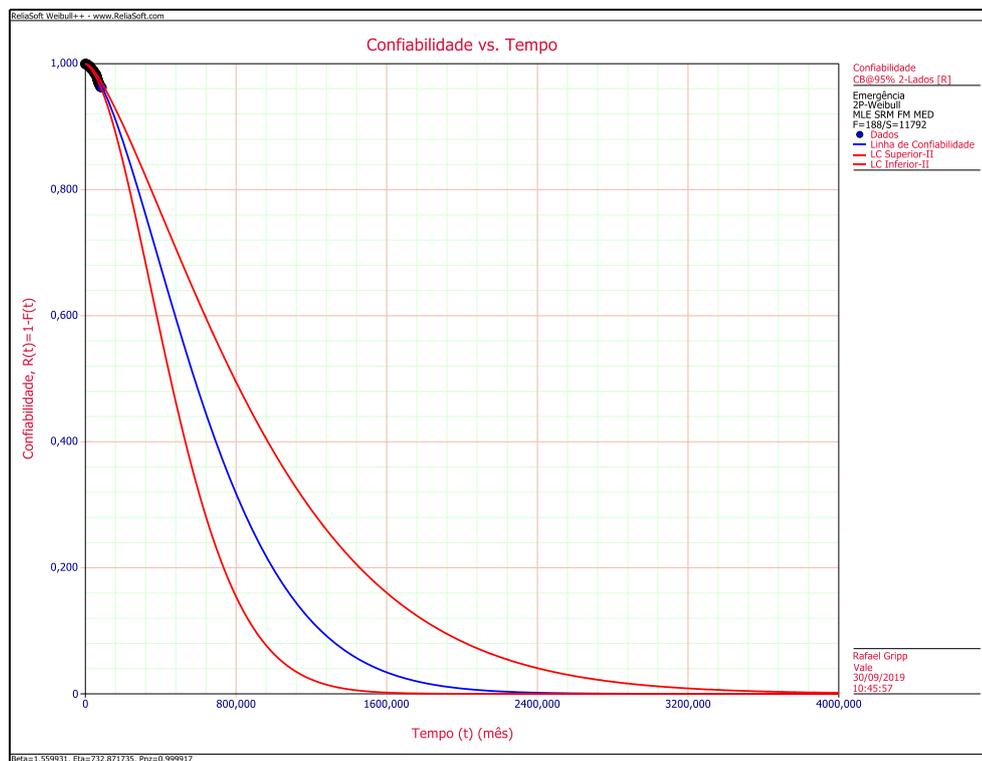
Figura 4.11 - Confiabilidade para missão de 75 meses - válvula de serviço



Fonte: O Autor, (2019)

Da mesma forma foi avaliada a confiabilidade para as válvulas de emergência, ao longo do tempo, como mostrado na figura 4.12.

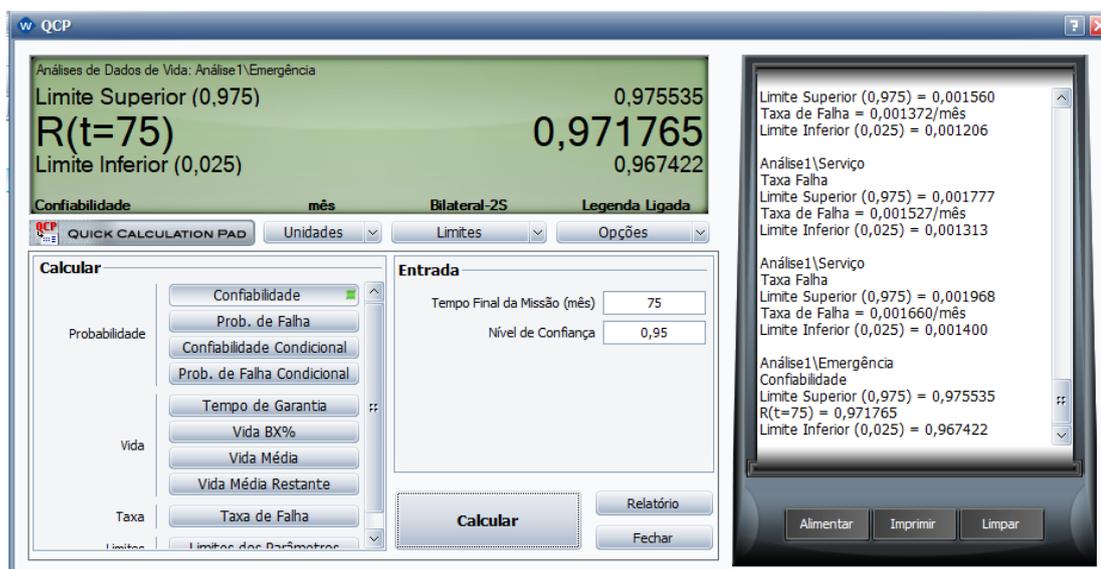
Figura 4.12 - Confiabilidade vs. Tempo para válvulas de emergência



Fonte: O Autor, (2019)

Para a frequência de manutenção do plano preventivo de freio, a confiabilidade é mostrada ao fim do período de 75 meses, na figura 4.13.

Figura 4.13 - Confiabilidade para missão de 75 meses - válvula de emergência



Fonte: O Autor, (2019)

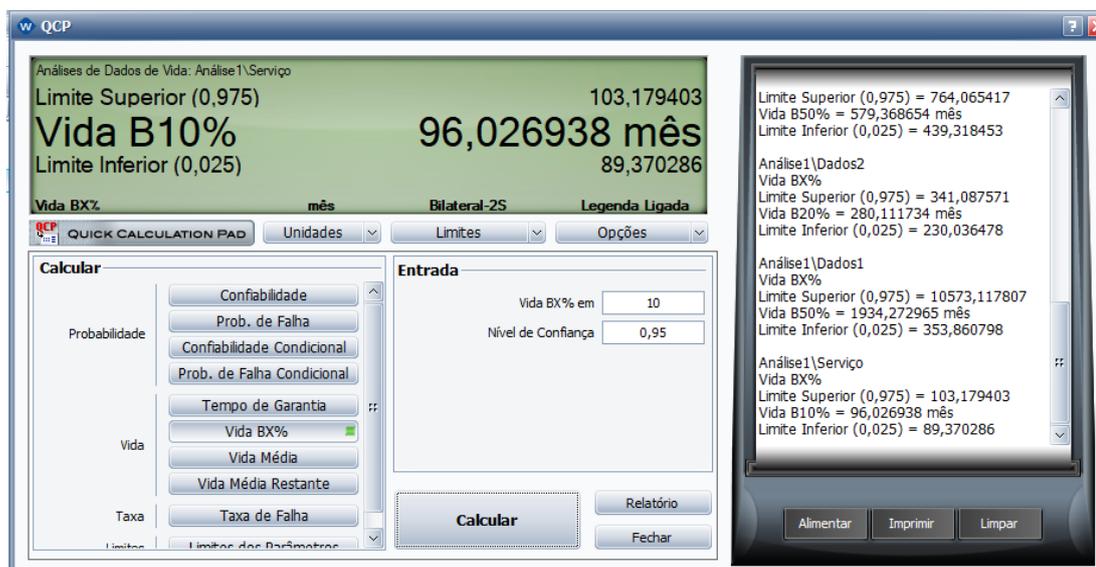
Com isso, para um plano de 75 meses, tem-se uma confiabilidade de 92,7% para válvulas de serviço e 97,2% para válvulas de emergência.

Uma vez que a cada 15 meses o vagão é trazido para manutenção para um plano de inspeção de oficina e que a cada carregamento e descarga é inspecionado, permitem-se valores de confiabilidade menores para as válvulas de serviço e emergência.

Com a premissa de que o conjunto de válvulas de controle deve ser trocado por completo, ou seja, no plano preventivo ao se retirar uma válvula para manutenção a outra também deverá ser retirada, definiu-se o valor de confiabilidade objetivo para a frota de válvulas de controle.

Este valor é de 90%, ou seja, a primeira válvula que atingir este gatilho de confiabilidade definirá a periodicidade do plano de manutenção preventiva. Desta forma, foi calculada a vida B10% para as válvulas de serviço a fim de se observar o tempo de missão suportada, mantendo a confiabilidade de 90%, como mostrado na figura 4.14.

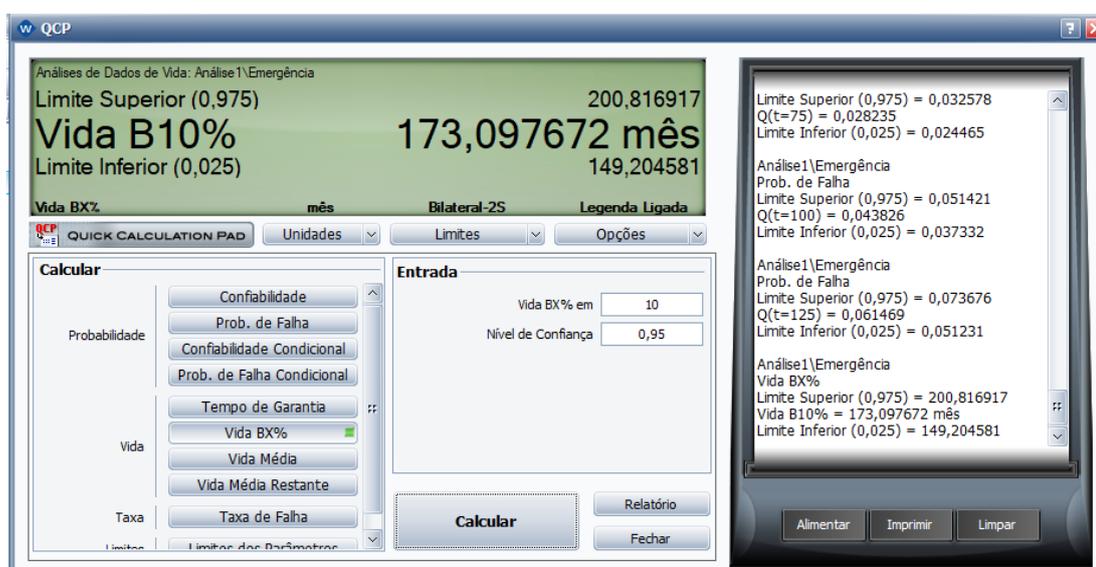
Figura 4.14 - Vida B10% para válvulas de serviço



Fonte: O Autor, (2019)

Da mesma forma, foi calculada a vida B10% para válvulas de emergência, onde foi verificado o tempo de missão suportada, mantendo a confiabilidade de 90%, como apresentado na figura 4.15.

Figura 4.15 - Vida B10% para válvulas de emergência



Fonte: O Autor, (2019)

Observando os valores calculados, nota-se que as válvulas de serviço atingem a confiabilidade objetivo de 90% em um período menor que as válvulas de

emergência. As válvulas de serviço têm uma missão calculada de 96 meses e as válvulas de emergência 173 meses.

4.1 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a classificação dos dados referentes a ordens de manutenção e notas de manutenção, bem como a aplicação no software Weibull++ 11. Escolheu-se a distribuição estatística mais adequada, utilizando o teste de aderência do software, para ambos os casos a distribuição Weibull-2P foi a mais adequada.

Os parâmetros da distribuição foram analisados, verificando seus conceitos com o observado nas práticas da manutenção dos vagões GDE e os conjuntos de válvulas de controle. E por fim chegou-se a confiabilidade para a estratégia de manutenção atual e uma periodicidade de plano preventivo para uma confiabilidade objetivo.

Esta etapa tem relevância, por fornecer informações sobre o comportamento da frota de conjuntos da válvula de controle, além permitir análises e propostas que subsidiem alterações na estratégia atual.

No capítulo 5, último capítulo deste trabalho, serão apresentadas as conclusões sobre os resultados observados e serão apresentadas propostas de trabalhos futuros

5 CONCLUSÕES

O Brasil é destaque na produção e exportação de commodities, e com suas dimensões continentais o transporte destas cargas de grande volume e peso se torna desafiador, uma vez que as zonas produtoras ficam distantes dos portos.

O minério de ferro representa 74,2% do transporte ferroviário brasileiro, o que faz com que a utilização dos vagões que o transportam seja intensa, gerando também alta demanda de manutenção. Com isso a otimização das estratégias e planos de manutenção se torna importante para manutenção do desempenho da frota.

A estratégia de manutenção que utiliza a separação do vagão em sistema permite um acompanhamento individualizado da vida dos componentes que compõem cada sistema. Para o sistema de freio, dentre os diversos componentes que compõem o conjunto pneumático, o conjunto de válvulas de controle é o responsável pelas aplicações e alívios do freio do vagão.

Conhecendo os conceitos de confiabilidade, análise de dados de vida e distribuições estatísticas, bem como o funcionamento do freio de um vagão ferroviários, esclarecidos por meio de pesquisa bibliográfica, pode-se consolidar e classificar os dados do sistema informatizado de manutenção, permitindo utilização em software de análise de confiabilidade.

Com a escolha da distribuição de estatística mais adequada, escolheu-se Weibull-2P como melhor opção. Após análise dos parâmetros e plotagem da pdf para válvulas de serviço e válvulas de emergência, pode-se calcular a confiabilidade para a estratégia atual de manutenção, com plano preventivo de 75 meses.

Com isso verificou-se uma confiabilidade de 92,7% para válvulas de serviço e 97,2% para válvulas de emergência, que é superior à esperada pela manutenção e operação dos vagões.

Com um objetivo de 90% de confiabilidade, buscou-se conhecer qual a melhor periodicidade para o plano preventivo, atendendo este valor de confiabilidade e considerando que a válvula de serviço e a válvula de emergência serão trocadas juntas no plano preventivo.

Assim, obteve-se uma periodicidade de 96 meses para válvulas de serviço e 173 meses para válvulas de emergência, mostrando ser possível alterar o plano de

manutenção de 75 meses para 96 meses, sem comprometer os objetivos de confiabilidade das válvulas de controle.

Desta forma, concluiu-se um estudo de análise de dados de vida, permitindo que a estratégia atual de manutenção pudesse ser questionada, cumprindo plenamente o objetivo geral proposto no início do trabalho, bem como o cumprimento de todos os objetivos específicos listados.

Durante a realização deste trabalho, algumas dificuldades no tratamento dos dados oriundos do sistema informatizado de manutenção foram observadas, o que causou forte impacto no tempo programado para tratamento dos dados, mostrando que uma revisão da forma de *input* e *download* dos dados no sistema informatizado de manutenção pode acelerar análises futuras.

Para uma revisão completa da estratégia de freio são sugeridos alguns temas para trabalhos futuros.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do estudo realizado neste trabalho e das conclusões expostas acima, sugere-se alguns temas que permitam o aprofundamento e expansão dos conceitos aplicados, para otimização da estratégia de manutenção preventiva de freios de vagões ferroviários.

Como primeiro tema, uma vez que os resultados mostraram possibilidade de ampliação de 28% na periodicidade do plano, sugere-se um estudo amostral na frota de válvulas, verificando o retorno em garantia na manutenção das válvulas e comparando com os dados inseridos no sistema informatizado de manutenção.

Também se sugere replicação da metodologia utilizada para ordens e notas de manutenção para análise de confiabilidade dos demais itens substituídos preventivamente no plano de freio, a fim de avaliar a troca dos componentes em periodicidades diferentes.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA CNT de Notícias. Volume de cargas transportadas por ferrovias cresce 10% em um ano. **Confederação Nacional dos Transportes**, 15 ago. 2018. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/volume-cargas-transportadas-ferrovias-cresce-10-um-ano>>. Acesso em: 20 set. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro. 1994.

BARBOSA, Juarez. Estratégia de Manutenção. **Consultoria & Engenharia**. 04 jan. 2017. Disponível em: <<https://consultoriaengenharia.com.br/engenharia-de-manutencao/estrategia-de-manutencao/>> Acesso em: 29 ago. 2019.

BORBA, José Luiz; BERGANTINI, Mauro Antônio. **Sistema de Locomotivas e Vagões I – Módulo Sistema de Freios**. Vale S.A. Vitória, 2011. Apostila do Treinamento de Trilha Técnica: Ferrovia (Pátio/Tração).

NYAB, New York Air Brake. **Válvula de controle DB-60: Instrução de Manutenção para válvula de controle DB-60 MU-24**. mar. 1988. Indústria de Freio Knorr Ltda.

NYAB, New York Air Brake. **Válvula de Controle DB-60: Manual de Instruções MU-21**. fev. 2000, New York Air Brake Corporation, A Knorr-Bremse Company.

NYAB – New York Air Brake. **DB-60 Control Valve**. Disponível em: <http://www.nyab.com/en/products/db60/db60_1.jsp>. Acesso em 15 ago. 2019.

LEMES, Danielli V. **Proposta de método de análise de confiabilidade de sistemas eletrônicos empregando dados de retorno de garantia**, 2006. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

LI, Carolina N. de. 5 dicas para melhorar o desempenho dos planos de manutenção. **Blog Rede Industrial**. 06 out. 2016. <<https://blog.redeindustrial.com.br/5-dicas-para-melhorar-o-desempenho-dos-planos-de-manutencao-1e6d7fc70a4b>> Acesso em 29 ago. 2019.

LIMA, Arthur S. **Definição da melhor política de manutenção para gestão e otimização de maquinário centrada na confiabilidade: Estudo em uma empresa do setor de transportes**. 83 f. Trabalho de conclusão de curso – engenharia de produção. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014.

MAYER, Fernando de Pol. **Variáveis aleatórias e distribuições de probabilidade**. 83 f. Apostila do Laboratório de Estatística e Geoinformação (LEG). Universidade Federal do Paraná, 2016.

MAZZEI, Denis. **Modelagem e análise de dados de vida (G400 ReliaSoft)**. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade. Curitiba, 2018. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

REIS, Manoel. A. S., MIGUEL, Priscila. L. S. Panorama do Transporte Ferroviário no Brasil – Desafios e Oportunidades. **FGV Projetos**, 25 ago. 2015. Disponível em: <http://fgvprojetos.fgv.br/sites/fgvprojetos.fgv.br/files/artigo_panorama_do_transporte_ferrovuario_no_brasil_-_desafios_e_oportunidades5.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2018.

SANTOS, Gustavo F. **Proposta de implantação de manutenção centrada em confiabilidade (MCC) na manutenção de vagões tipo GDE utilizando FMEA**. 80 f. Monografia especialização engenharia de manutenção, Faculdade Brasileira – MULTIVIX. Vitória, 2017.

SANTOS, Gustavo F. **Apostila Vagões, Carros de Passageiro e Trens Unidade – revisão 02**. 227 f. Faculdade Estácio de Sá. Vitória, 2019.

SANTOS, Isaac P. **Importância à análise de confiabilidade: uma aplicação ao setor de transportes**. 46 f. Monografia especialização em estatística aplicada, Universidade Estadual da Paraíba, 2016.

SIEMENTKOWSKI, Nayara F. **Análise de modos de falhas em sistemas de freio de vagão de carga com aplicação de FMEA**. 67 f. Trabalho de conclusão de curso – engenharia metroviária e ferroviária, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

SILVA, Julio Cesar Martins da Costa e; **Sistema de freio para vagões**. Belo Horizonte: MRS Logística, 2018. 181 f. Apostila do treinamento de capacitação de freistas MRS Logística.

SILVA, Paulo Rogério Ferreira da; KINA, Edilson Jun; BERGANTINI, Mauro Antônio. **Trainee Corporativo VLI - Vagões**. Belo Horizonte: Vale S.A., 2013. Apostila do Curso de Trainee Corporativo VLI PUC/MG.

APÊNDICE A

Tabela de dados consolidados referentes a válvulas de serviço.

Período (meses)	Completos	Suspensos
0	2	153
1	7	168
2	6	162
3	3	178
4	13	164
5	15	168
6	19	107
7	12	174
8	8	209
9	5	166
10	3	181
11	6	184
12	4	190
13	4	182
14	6	178
15	6	196
16	6	166
17	4	187
18	8	177
19	6	154
20	2	140
21	5	158
22	5	148
23	2	149
24	3	146
25	0	143
26	5	137
27	5	138
28	4	135
29	6	125

Período (meses)	Completos	Suspensos
30	3	123
31	10	101
32	4	176
33	3	165
34	6	126
35	6	97
36	6	95
37	4	101
38	7	96
39	4	100
40	3	102
41	9	106
42	4	101
43	3	90
44	5	91
45	2	91
46	10	75
47	4	160
48	4	247
49	5	86
50	7	160
51	2	127
52	3	63
53	4	145
54	3	97
55	2	111
56	3	128
57	7	137
58	9	126
59	8	136
60	7	136
61	5	139
62	5	135
63	5	141

Período (meses)	Completos	Suspensos
64	6	135
65	3	143
66	6	137
67	5	81
68	8	95
69	8	68
70	6	126
71	6	87
72	7	75
73	9	57
74	4	85
75	17	78
76	6	76
77	11	80
78	11	50
79	4	91
80	4	129
81	5	91
82	5	108
83	3	94
84	1	82
85	1	107
86	0	86
87	2	82
88	2	96
89	4	72
90	2	82
91	1	58
92	0	92
93	1	81
94	0	88
95	0	67
96	1	65
97	0	73

Período (meses)	Completos	Suspensos
98	0	58
99	0	65
100	0	56
101	0	44
102	0	47
103	0	55

APÊNDICE B

Tabela da dados consolidados referentes a válvulas de emergência.

Período (meses)	Completos	Suspensos
0	1	141
1	1	157
2	6	150
3	1	167
4	0	148
5	1	152
6	2	82
7	1	155
8	1	178
9	1	142
10	0	153
11	2	159
12	1	165
13	1	160
14	3	157
15	2	177
16	2	151
17	4	161
18	3	141
19	2	140
20	2	127
21	3	145
22	5	138
23	0	137
24	0	136
25	1	130
26	2	132
27	4	130
28	0	126
29	4	126

Período (meses)	Completos	Suspensos
30	4	122
31	3	91
32	2	170
33	2	167
34	4	122
35	3	91
36	3	97
37	3	97
38	5	91
39	1	93
40	2	88
41	0	83
42	3	91
43	2	85
44	2	86
45	1	85
46	7	86
47	3	169
48	1	245
49	1	79
50	5	158
51	0	126
52	1	68
53	2	150
54	3	99
55	2	115
56	1	136
57	3	135
58	0	129
59	3	138
60	6	137
61	3	142
62	4	137
63	4	137

Período (meses)	Completos	Suspensos
64	4	138
65	2	149
66	4	135
67	2	86
68	6	93
69	3	71
70	1	130
71	3	87
72	2	70
73	1	55
74	2	86
75	2	73
76	1	75
77	1	72
78	4	55
79	0	97
80	1	133
81	0	100
82	2	109
83	1	105
84	0	83
85	0	110
86	1	96
87	0	93
88	1	97
89	0	78
90	0	94
91	0	62
92	0	104
93	0	92
94	0	101
95	0	73
96	0	73

Período (meses)	Completos	Suspensos
97	0	85
98	0	71
99	0	73
100	0	63
101	0	45
102	0	51
103	0	62