

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Saymon Ricardo de Oliveira Sousa

**TEMPO DE SOBREVIDA EM TRANSPORTADORES DE GRANÉIS
SÓLIDOS EM UM PORTO DA REGIÃO NORDESTE**

Santa Maria, RS
2019

Saymon Ricardo de Oliveira Sousa

**TEMPO DE SOBREVIDA EM TRANSPORTADORES DE GRANÉIS SÓLIDOS EM
UM PORTO DA REGIÃO NORDESTE**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração Gerência da Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Orientadora: Prof. Dra. Roselaine Ruviaro Zanini

Santa Maria, RS
2019

Sousa, Saymon Ricardo de Oliveira
Tempo de sobrevivência em transportadores de grânéis
sólidos em um porto da região nordeste / Saymon Ricardo
de Oliveira Sousa.- 2019.
96 p.; 30 cm

Orientadora: Roselaine Ruviaro Zanini
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, RS, 2019

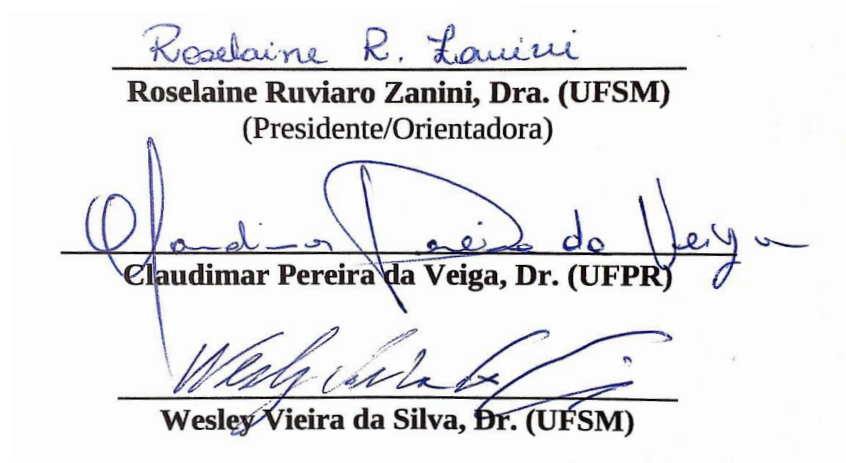
1. Equipamentos Portuários 2. Análise de Sobrevivência 3.
Kaplan-Meier 4. Manutenção Industrial 5. Regressão de Cox
I. Zanini, Roselaine Ruviaro II. Título.

Saymon Ricardo de Oliveira Sousa

**TEMPO DE SOBREVIDA EM TRANSPORTADORES DE GRANÉIS SÓLIDOS EM
UM PORTO DA REGIÃO NORDESTE**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração em Gerência da Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Aprovado em 19 de fevereiro de 2019



Roselaine R. Zanini
Roselaine Ruviano Zanini, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Claudimar Pereira da Veiga
Claudimar Pereira da Veiga, Dr. (UFPR)

Wesley Vieira da Silva
Wesley Vieira da Silva, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Paulo Roberto de Sousa e Jocélia de Oliveira Sousa, ao meu irmão, Paulo Roberto de Sousa Filho, pelo total apoio durante minha jornada, além do amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Em especial, as pessoas que, diretamente ou indiretamente, colaboraram nessa caminhada. Meu agradecimento:

- Aos meus pais, Paulo Roberto de Sousa e Jocélia de Oliveira Sousa, ao meu irmão Paulo Roberto de Sousa Filho, por me ensinarem o verdadeiro valor da vida, por me mostrarem o caminho da sabedoria, pelo amor incondicional, por me fazerem uma pessoa melhor a cada dia e por passarem a sonhar meus sonhos, unidos em um só. Obrigado por tudo, sempre carregarei vocês em meu coração por onde quer que eu vá.

- A minha família, em especial meus avós: Raimundo José de Sousa e Adalgiza Soares de Sousa (In memoriam); José Alves da Silva e Josina Maria de Oliveira, por formarem a base de tudo. Aos meus tios, tias, primos e primas, sabemos o quanto formamos uma bela companhia e como eternizar momentos.

- Minha namorada Raphaela Fernandes Tinoco, pela paciência, companheirismo, amor e dedicação.

- Aos meus amigos, por toda força e torcida nessa jornada, pelas conversas, pelo respeito e pela consideração, sem dúvidas vocês fazem parte de cada história e vitória.

- À minha orientadora Dra. Roselaine Ruviaro Zanini, pela oportunidade de fazer parte de sua história e pelo amor a sua profissão, pelo respeito, carinho e pela sua amizade. Saiba que a palavra que define tudo é “Gratidão”. Serei eternamente grato por cada ensinamento e cada momento compartilhado. Muito obrigado.

- Ao meu grande amigo de caminhada Ícaro Romolo Sousa Agostino, sabemos de todas as dificuldades que passamos, a distância de casa e a saudade da família. Tens meu respeito e minha eterna lealdade.

- Aos meus colegas de caminhada, pelos momentos compartilhados, pelas brincadeiras e auxílios. Desejo a todos uma vida próspera.

- À Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de realização desse objetivo pessoal e profissional.

- O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Por fim, entretanto, não menos importante, aos autores que foram citados nas referências, sabemos que uma pesquisa não se inicia de algo vazio, nada que dissemos ou escrevemos alguém um dia já não tenha exposto.

"Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível."

Charles Chaplin

RESUMO

TEMPO DE SOBREVIDA EM TRANSPORTADORES DE GRANÉIS SÓLIDOS EM UM PORTO DA REGIÃO NORDESTE

AUTOR: Saymon Ricardo de Oliveira Sousa
ORIENTADORA: Roselaine Ruviano Zanini

O objetivo dessa pesquisa foi estimar a sobrevida de um grupo de equipamentos industriais portuários denominados transportadores de granéis sólidos, contribuindo assim para tomada de decisão do processo de manutenção. Este estudo foi realizado na área de descarga de vagões e embarque de minério do Terminal Marítimo Portuário localizado no litoral do estado do Maranhão. O desfecho foi o tempo, em horas, até a falha dos equipamentos. As covariáveis de interesse para comparação das curvas de sobrevida foram: (i) o turno de trabalho, dividindo-se em (turno 1, turno 2 e turno 3); (ii) o equipamentos de origem classificados em (viradores de vagões, empilhadeira recuperadora ou recuperadora); (iii) os tipos de minério, divididos em (Sinter, Granulado, Pellet Feed ou Manganês); (iv) os tipos de falhas consideradas para o estudo serão (sonda, chave de emergência, detectora de rasgo e sobrecarga) (v) e a área de operação, classificadas como (descarga e embarque de minério). Utilizou-se o método de Kaplan-Meier para estimar a probabilidade de sobrevida global e comparou-se as curvas utilizando o teste de Log-rank. O efeito de cada covariável no tempo de sobrevida dos transportadores foi analisado por meio do modelo de regressão de Cox e para o qual, foi realizada a análise de resíduos e observações influentes. A probabilidade de sobrevida de 75% do sistema de movimentação de material granel equivale a um tempo de disponibilidade operacional de 444 horas. Observou-se que, dos 95 transportadores avaliados, 38 (40%) falharam e 57 (60%) foram censurados até o final do estudo. Os resultados mostram uma diminuição significativa da probabilidade de sobrevida dos equipamentos no decorrer do tempo de operação, além da diferença significativa entre as curvas de sobrevida das covariáveis turno, tipos de minérios, quantidade de vagões e toneladas movimentadas, indicado que as mesmas, são importantes preditoras no modelo de regressão de Cox. Esta pesquisa apresentou uma contribuição original para a literatura, por ser o primeiro estudo a investigar os fatores de risco associados a falhas de equipamentos utilizados no Terminal Marítimo de Ponta da Madeira por meio da análise de sobrevida.

Palavras-chave: Equipamentos Portuários. Análise de Sobrevida. Kaplan-Meier. Manutenção Industrial. Regressão de Cox.

ABSTRACT

SURVEY TIME ON SOLID GRANITE CONVEYORS AT A PORT IN THE NORTHEAST REGION

AUTHOR: Saymon Ricardo de Oliveira Sousa

ADVISOR: Roselaine Ruviaro Zanini

The objective of this research was to estimate the survival of a group of industrial port equipment called solid bulk conveyors, thus contributing to decision making of the maintenance process. This study was carried out in the area of unloading of wagons and shipment of ore from the Port Maritime Terminal located on the coast of the state of Maranhão. The outcome was the time, in hours, until the equipment failure. The covariates of interest for comparison of the survival curves were: (i) the work shift, divided into (shift 1, shift 2 and shift 3); (ii) equipment of origin classified as (wagon turners, recovery or recovery forklift); (iii) types of ore divided into (Sinter, Granulate, Pellet Feed or Manganese); (iv) the types of failures considered for the study will be (probe, emergency key, tear and overload detector) (v) and the operating area, classified as (discharge and shipment of ore). The Kaplan-Meier method was used to estimate the overall survival probability and the curves were compared using the log-rank test. The effect of each covariant on the survival time of the transporters was analyzed using the Cox regression model and for which the residue analysis and influential observations were performed. The 75% survival probability of the bulk material handling system is equivalent to an operational availability time of 444 hours. It was observed that of the 95 carriers evaluated, 38 (40%) failed and 57 (60%) were censored until the end of the study. The results show a significant decrease in the probability of survival of the equipment during the operating time, besides the significant difference between the survival curves of the covariables shift, types of ores, number of wagons and tons moved, indicated that they are important predictors in the Cox regression model. This research presented an original contribution to the literature, being the first study to investigate the risk factors associated with equipment failures used in the Maritime Terminal of Ponta da Madeira through the analysis of survival.

Keywords: Port Equipment. Survival Analysis. Kaplan-Meier. Industrial Maintenance. Regression of Cox.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Terminal marítimo de Ponta da Madeira - Píer IV	19
Figura 2 – Distribuição geográfica dos portos brasileiros.....	21
Figura 3 – Participação percentual em relação dos tipos de carga	22
Figura 4 – <i>Ranking</i> da movimentação das cargas em portos públicos e privados	23
Figura 5 – Evolução do processo de manutenção segundo as gerações.....	26
Figura 6 - Controle preditivo dos equipamentos	29
Figura 7 – Ciclo gerencial da manutenção dos serviços.....	30
Figura 8 – <i>Overview</i> das áreas de operação do TMPM.....	55
Figura 9 – Operações básicas TMPM.....	56
Figura 10 – Correia Transportadora (CT)	57

ARTIGO - AVALIAÇÃO DO TEMPO DE SOBREVIDA DE TRANSPORTADORES DE GRANÉIS SÓLIDOS EM UM TERMINAL MARÍTIMO PORTUÁRIO

Figura 1 – Operações básicas realizadas no Terminal Marítimo Portuário.....	66
Figura 2 – Correias transportadoras (CT).....	67
Figura 3 – Métodos de análise e seleção dos modelos para as covariáveis turno, tipos de minério, quantidade de vagões e toneladas movimentadas.....	68
Figura 4 – Curva de probabilidade de sobrevida global dos transportadores.....	72
Figura 5 – Curvas de probabilidade de sobrevida por turno de trabalho.....	74
Figura 6 – Curvas de probabilidade de sobrevida dos tipos de minério.....	75
Figura 7 – Curvas de probabilidade de sobrevida pelos tipos de falhas.....	76
Figura 8 – Resíduos de Schoenfeld gerados pelo modelo de Cox ajustado	79
Figura 9 – Resíduos de martingale e <i>deviance</i> para as covariáveis turno, tipos de minério, quantidade de vagões e toneladas movimentadas	80
Figura 10 – Resíduos de <i>score</i> para as covariáveis turno, tipos de minério, quantidade de vagões e toneladas movimentadas	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos sobre Análise de Sobrevida na área de Engenharia de Produção	38
Quadro 2 – Características gerais da análise de sobrevida	41
Quadro 3 – Comparação de algumas medidas estatísticas segundo a abordagem de análise ..	42
Quadro 4 – Tipos e características das censuras.....	43
Quadro 5 – Classificação da pesquisa	54
Quadro 6 – Definição constitutiva e operacional das covariáveis.....	58

LISTA DE TABELAS

ARTIGO – AVALIAÇÃO DO TEMPO DE SOBREVIDA DE TRANSPORTADORES DE GRANÉIS SÓLIDOS EM UM TERMINAL MARÍTIMO PORTUÁRIO

- Tabela 1 – Distribuição dos transportadores de acordo com o número de falhas, censuras e o resultado do teste de Log-rank para comparação das curvas de sobrevivência73
- Tabela 2 – Resultados do ajuste do modelo de regressão de Cox univariado e multivariável para o tempo de sobrevivência dos transportadores de granel sólido78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ATR	<i>Automatic Traffic Sensors</i>
CN's	Carregadores de Navio
CODEBA	Companhia das Docas do Estado da Bahia
CT	Correias Transportadoras
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EP	Empilhadeira
ER	Empilhadeira Recuperadora
HD	Horas Disponíveis
HIM	Horas de Indisponibilidade para a operação devido à Manutenção
MCC	Manutenção Centrada na Confiabilidade
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria comércio Exterior e Serviços
MP	Manutenção Preventiva
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
MTPA	Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
NC	Número de Intervenções Corretivas
PND's	Planos Nacionais de Desenvolvimento
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
RR	Recuperadora
SPE	Sociedade Portuguesa de Estatística
PASW	<i>Statistical Package for Social Sciences</i>
TMPF	Tempo Médio para Falha
TMPM	Terminal Marítimo de Ponta da Madeira
TUP	Terminal de Uso Privado
VV's	Viradores de Vagões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	PROBLEMÁTICA	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.3	JUSTIFICATIVA	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	ATIVIDADE PORTUÁRIA NO BRASIL	19
2.2	A DISPONIBILIDADE OPERACIONAL DE EQUIPAMENTOS	24
2.3	DEFINIÇÕES E HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO	25
2.4	OS MÉTODOS DE MANUTENÇÃO	27
2.4.1	Manutenção Corretiva	27
2.4.2	Manutenção Preventiva	27
2.4.3	Manutenção Preditiva ou Condicionada	28
2.4.4	Manutenção Detectiva	29
2.5	GESTÃO ESTRATÉGICA DA MANUTENÇÃO	30
2.6	CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO INDUSTRIAL.....	32
2.6.1	Funções de Confiabilidade	33
2.6.2	Distribuições de Probabilidade em Manutenção	34
2.6.2.1	<i>Distribuição Exponencial</i>	34
2.6.2.2	<i>Distribuição Lognormal</i>	35
2.6.2.3	<i>Distribuição Gama</i>	36
2.6.2.4	<i>Distribuição de Weibull</i>	37
2.7	ESTUDOS DE ANÁLISE DE SOBREVIDA.....	37
2.8	ANÁLISE DE SOBREVIDA	40
2.8.1	Técnicas de Sobrevida Não-Paramétricas	45
2.8.1.1	<i>Estimador de Kaplan-Meier</i>	45
2.8.1.2	<i>Estimador de Nelson-Aalen</i>	46
2.8.2	O Método de Máxima Verossimilhança	46
2.8.3	Modelo de Regressão de Cox	48
2.8.3.1	<i>Ajuste do modelo de Cox</i>	49
2.8.3.2	<i>Testes de significância dos coeficientes</i>	50
2.8.3.3	<i>Estimação de funções relacionadas com $h_0(t)$</i>	51
2.8.3.4	<i>Qualidade geral de ajuste do modelo</i>	52
2.8.3.5	<i>Teste de Log-rank para comparação de curvas de sobrevida</i>	52
3	MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	54
3.2	LOCAL DO ESTUDO	55
3.3	COLETA DE DADOS	57
3.4	MÉTRICAS DE ANÁLISE DOS DADOS	61
4	ARTIGO – AVALIAÇÃO DO TEMPO DE SOBREVIDA DE TRANSPORTADORES DE GRANÉIS SÓLIDOS EM UM TERMINAL MARÍTIMO PORTUÁRIO	62
5	CONCLUSÃO	86
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

Para adotar um modelo matemático, é preciso um conjunto de pressupostos para determinar o problema, o qual deve envolver uma precisão aceitável de acordo com a realidade. Os dados extraídos a partir de equipamentos idênticos são combinados para um estudo de uma parte dos dados, ou seja, os equipamentos idênticos são assumidos como uma fonte de informações (KHALIL; SAAD; GINDY, 2009).

Um dos mais importantes instrumentos analíticos que pode ser aplicado em diversos campos da ciência é a modelagem estatística. Os benefícios do uso de modelos estatísticos para o detalhamento e exposição da instrução científica, em geral, estão na perspectiva de afirmações probabilísticas. Na idealização de intervalos de confiança, essa origem de variabilidade é interpretada como o nível de indefinição em conexo às previsões elaboradas pelo modelo (CARVALHO et al., 2011).

Em sistemas industriais complexos, a deterioração dos equipamentos e a produção de produtos defeituosos são pontos importantes que aumentam os custos inerentes da função produção. A implantação de políticas de manutenção associada ao monitoramento estatístico dos processos pode contribuir de forma significativa para a melhoria dos produtos e para confiabilidade dos equipamentos. Por isso, nos últimos anos os modelos estatísticos e as políticas de manutenção têm atraído pesquisadores a desenvolverem estudos nessas temáticas (YANG et al., 2018).

À medida em que as indústrias se tornam cada vez mais competitivas, os métodos empregados na busca de melhorias dos resultados estão estritamente relacionados à eficiência. Embora a eficiência possa ser alcançada por intermédio da tecnologia, a mesma só poderá ser confiável com base no fato que o sistema implantado seja capaz de verificar e gerenciar as falhas da melhor maneira (MADEIRA; INFANTE; DIDELET, 2013).

Na gestão da produção, todas as atividades podem contribuir significativamente para o bom desempenho de qualquer organização, seja de bens ou serviços, uma vez que utilizando os recursos disponíveis de forma eficaz implicará na satisfação dos seus consumidores. Uma operação eficaz poderá trazer determinados benefícios, como: minimizar os custos de manutenção, reduzir os investimentos para produção e maximizar a capacidade efetiva com maior confiabilidade dos equipamentos. Entre as funções operacionais e gerenciais, a manutenção é uma das mais relevantes, pois assume um papel estratégico na estrutura das organizações refletindo na operação, na logística e na percepção da qualidade (SLACK; BRANDON-JONES; JHONSTON, 2015).

A análise de sobrevida é um conjunto de mecanismos e métodos estatísticos utilizados no estudo de experiências, na qual a variável dependente é o período observado até um evento estimado. Os indivíduos analisados podem ser animais, humanos, plantas, equipamentos, dentre outros. Em contrapartida, o evento de interesse pode ser falha de um equipamento, morte, remissão de uma doença, etc. A característica básica dos dados de sobrevida é a existência de censuras, que é a observação parcial da resposta. Essa informação embora incompleta, é favorável e importante para análise (NAKANO; CARRASCO, 2006; SILVA, 2011; LOUZADA; FERREIRA; DINIZ, 2012).

No contexto industrial, a análise de sobrevida pode ser aplicada a fim de verificar a probabilidade de sobrevida do tempo zero até o tempo final considerado, sendo de grande utilidade em análise de falhas. É do interesse de qualquer organização desenvolver um sistema de gestão da manutenção para resolver problemas e prever a indisponibilidade não planejada de equipamentos. As falhas são identificadas em relação à parcela da máquina afetada, essas falhas são codificadas para razões de segurança. Os dados históricos apresentam o comportamento do sistema durante toda a sua vida, em que tal comportamento de um sistema pode mudar consideravelmente por muitas razões, em grande parte relacionadas a questões técnicas (KHALIL; SAAD; GINDY, 2009).

Os equipamentos utilizados nos sistemas produtivos estão sujeitos a falhas aleatórias devido à intensidade de uso e à idade. As falhas ocorridas em tais sistemas podem ocasionar custos por paradas e manutenções não planejadas, em perdas de produção, riscos à segurança ocupacional e, em algumas situações, na redução do nível de serviços. Buscando a redução desses eventos, métodos de manutenção são empregados, fixando periodicamente inspeções de campo, ações de substituição de componentes antes que ocorram as falhas e, até mesmo, em operações de reparo após as falhas dos equipamentos, sendo reponsabilidade da estratégia de manutenção adotada por cada empresa. Os custos com a manutenção planejada são menores quando comparados com a manutenção não planejada, ainda mais em sistemas críticos e com o elevado preço de componentes de substituição (BIANCHINI; ROSSI; ANTIPODI, 2018).

A importância de prever falhas em equipamentos industriais com maior confiabilidade e rapidez faz com que novos métodos sejam explorados para trazer soluções e acelerar as estratégias de manutenção das organizações. Desse modo, esta pesquisa tem como propósito aplicar os métodos incorporados na análise de sobrevida para estimar o tempo de vida em transportadores de grânéis sólidos, caracterizados pelos tempos de falhas, e, geralmente, pela presença de censuras, além da definição dos elementos centrais dos tempos de falhas, sendo esses, o tempo inicial, a escala de medida e o evento de interesse para o caso específico.

1.1 PROBLEMÁTICA

As condições dos negócios estão mudando rapidamente e continuamente, pois os mercados são afetados pelas crescentes necessidades dos consumidores que exigem cada vez mais qualidade, velocidade, elevados níveis de atendimento e preços compatíveis. Ao mesmo tempo, a vida útil de equipamentos e os ciclos dos produtos estão ficando cada vez mais curtos. Mudanças no maior uso de mecanização e automação nos processos produtivos, sistemas flexíveis de fabricação e armazenagem automática estão acontecendo no ambiente interno das organizações (ALSYOUF, 2007).

A indisponibilidade de equipamentos classificados como críticos em um processo industrial é capaz de ocasionar atrasos na disponibilização de produtos, insatisfação dos consumidores e acréscimo dos custos operacionais para as empresas. É importante que os mesmos disponham de alta confiabilidade e manutenibilidade, permitindo uma elevada disponibilidade. Entende-se por confiabilidade, como a probabilidade de um equipamento ou sistema de produção que opere nas especificações estabelecidas, sem manifestar falha por um determinado tempo. Enquanto a manutenibilidade é a probabilidade que, caso ocorra eventual falha, o reparo seja efetuado em tempo específico (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Medidas de prevenção de falhas são necessárias e devem ser tomadas para o bom funcionamento dos equipamentos industriais alinhadas com as estratégias organizacionais e com as políticas de manutenção (SILVA; CONCEIÇÃO; FRANÇA, 2014). Ainda, para os autores, toda empresa independente do segmento precisa de um sistema de gerenciamento da manutenção. Nesse cenário, o problema de pesquisa a ser investigado pode ser resumido no seguinte questionamento: qual o tempo e quais fatores associados à probabilidade de sobrevivência de equipamentos industriais de um Terminal Marítimo Portuário localizado no litoral do estado do Maranhão?

1.2 OBJETIVOS

Diante do apresentado, são apresentados os seguintes objetivos que nortearão este estudo.

1.2.1 Objetivo geral

Investigar o tempo de sobrevida em transportadores de granéis sólidos em um porto da região nordeste.

1.2.2 Objetivos específicos

Com o propósito de obter o objetivo geral deste estudo, foram discriminados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a sobrevida global dos transportadores de granéis sólidos.
- Estimar a sobrevida estratificada pelas covariáveis: turno de trabalho, equipamento de origem, tipos de minério, tipos de falha e área de operação.
- Identificar os principais fatores de risco associados às falhas dos transportadores.
- Ajustar um modelo de regressão de Cox para estimar a probabilidade de falha segundo os fatores de risco identificados.

1.3 JUSTIFICATIVA

Uma das maneiras mais eficientes de estabelecer uma perspectiva sobre aberturas de conhecimento é compreender o que já foi pesquisado e disseminado pela área, por isso, uma revisão de literatura é significativa para qualquer forma de pesquisa. Ao estudar a disponibilidade operacional de transportadores de granéis sólidos em uma planta portuária, com base em diversos métodos de manutenção, observa-se que as ferramentas utilizadas são empíricas e em poucos casos são baseadas em modelagem matemática. O uso da modelagem matemática para analisar a probabilidade de falhas sobre a sobrevida dos equipamentos é uma ferramenta benéfica que é pouco explorada no contexto industrial (KHALAF et al., 2013).

A vantagem da abordagem estatística é que os resultados podem ser otimizados e a máxima confiabilidade ou custo mínimo podem ser alcançados. Um método conhecido como Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) é considerado empírico, entretanto, bastante utilizado nas indústrias. Na teoria do MCC, alguns fatores podem ser usados para determinar o intervalo ótimo de manutenção como, a vida útil dos componentes que não foram projetados para durar, o tempo de vida útil dos dispositivos e a frequência de testes funcionais periódicos para confirmar que o equipamento está de acordo com as especificações de desempenho recomendadas pelo fabricante (KHALAF et al., 2013; MIRSAEEDI et al., 2017).

Os modelos estatísticos são mais robustos e flexíveis do que as abordagens empíricas e podem incorporar uma ampla variedade de pressupostos e restrições. Os modelos podem ser determinísticos ou probabilísticos. Um modelo determinístico estipula os resultados a partir das situações iniciais, ou seja, não consideram incertezas. Para prever os efeitos de falhas em equipamentos, os métodos probabilísticos são mais apropriados que os determinísticos, pois permitem cientificamente a utilização das técnicas estatísticas de inferência, assumindo a existência de variáveis aleatórias (ENDRENYI, 2006).

Na indústria de transformação e/ou serviços, é importante que os equipamentos possuam tanto a confiabilidade quanto a manutenibilidade, o que irá gerar alta disponibilidade dos ativos fixos. Métodos quantitativos e qualitativos são utilizados na gestão da manutenção, permitindo o gerenciamento da confiabilidade e disponibilidade. Para prever comportamentos e padrões dos equipamentos, utilizam-se previsões com base em dados históricos com a finalidade de originar informações que auxiliem na compreensão do objeto investigado e de fornecer subsídios para a tomada de decisão. Além disso, o gerenciamento da manutenção desempenha um papel importante no aprimoramento da confiabilidade e na minimização de custos gerados por interrupções não programadas (CORRÊA; CORRÊA, 2010; MENGUE; SELLITTO, 2013).

Sob o ponto de vista acadêmico, o trabalho visa contribuir para definição de estratégias e para tomada de decisão em relação a gestão da manutenção de equipamentos de movimentação de granéis sólidos. A construção de *insights* para novos estudos é pertinente, uma vez que se constatou na literatura acadêmica uma relativa escassez em aplicações práticas a dados reais da análise de sobrevivência no contexto industrial. Diante do exposto, este trabalho justifica-se pela relevância do tema e pela flexibilidade de utilização da metodologia exposta.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atender os propósitos da pesquisa, este trabalho está dividido em cinco capítulos, apresentados a seguir.

No **capítulo 1** é apresentada a introdução do tema, o objetivo geral do estudo, assim como os específicos, a problemática e a justificativa da pesquisa.

No **capítulo 2** apresenta-se revisão de literatura sobre a atividade portuária no Brasil, introduz o conceito de porto, o contexto histórico, a contribuição da atividade para economia, assim como a infraestrutura, função e serviços desempenhados. Aborda-se a importância da disponibilidade operacional de equipamentos industriais, o conceito de manutenção e os tipos,

a gestão da manutenção como estratégia organizacional, as técnicas preditoras da Manutenção Centrada na Confiabilidade assim como as distribuições utilizadas.

Ainda são descritas as funções de sobrevida, o estimador de Kaplan-Meier e Nelson-Aalen, apresenta-se a flexibilidade do método de máxima verossimilhança, os modelos probabilísticos empregados na análise de sobrevida. São abordados o modelo de Cox e o ajuste para o modelo, a estimação de funções relacionadas com o componente não-paramétrico e os testes de comparação de curvas de sobrevida.

No **capítulo 3** são descritos os materiais e métodos, é realizada a classificação da pesquisa quanto a natureza, a abordagem, os objetivos, o local do estudo, as variáveis consideradas e as etapas metodológicas adotadas.

No **capítulo 4** é apresentado o Artigo: Avaliação do tempo de sobrevida de transportadores de granéis sólidos em um terminal marítimo portuário.

O **capítulo 5** é composto pela conclusão da dissertação, limitações e recomendações para trabalhos futuros.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo se destaca por caracterizar inicialmente a atividade portuária no Brasil, em seguida, realiza-se uma contextualização quanto à importância da disponibilidade de equipamentos nas indústrias, além dos fundamentos da análise de sobrevivência e seus correlatos, a fim de proporcionar um entendimento amplo da temática investigada.

2.1 ATIVIDADE PORTUÁRIA NO BRASIL

O desenvolvimento de atividades de carga e descarga em embarcações mercantis remota à antiguidade, uma vez que a atividade aquaviária foi pioneira para o desenvolvimento da atividade comercial pela humanidade. De maneira holística, porto é conceituado como uma pequena baía ou uma ampla extensão de água, onde tal é protegida de maneira artificial ou natural de grandes ondas e fortes correntes, desempenhando um papel de refúgio e ancoradouro a navios, utilizando mecanismos que auxiliam o embarque e desembarque de cargas ou passageiros e atenda às necessidades de navegação, conforme apresentado na Figura 1 (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2001; ARRUDA, 2015).

Figura 1 – Terminal marítimo de Ponta da Madeira - Píer IV



Fonte: Emir (2017)

O porto é considerado uma junção na rede de transportes e existe para simplificar a locomoção de indivíduos e bens no espaço e tempo, proporcionando o desenvolvimento social e econômico. A localização de um porto à margem do oceano é frequentemente conhecida como

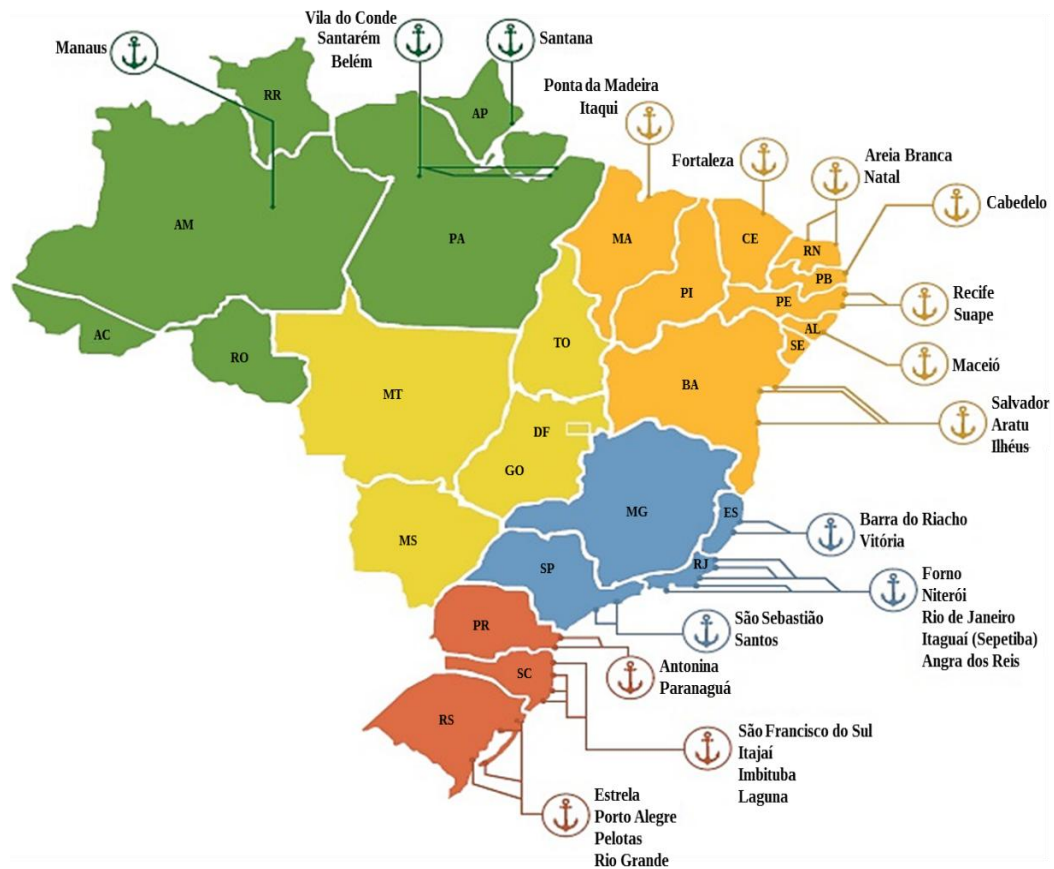
porto marítimo e às margens do rio é denominado de porto fluvial. Existem características fundamentais para implantação de um porto, tais como canais profundos, proteção contra ondas, ventos e acesso a estradas e ferrovias. A reorganização do transporte marítimo e fluvial ao longo das últimas décadas alterou consideravelmente a configuração de navios, a tecnologia de movimentação de cargas e a estrutura física e funcional portuária (GONZALEZ; TRUJILLO, 2008).

Esses portos incluem uma variedade de infraestruturas, como os quebra-mares para proteger o porto da ação excessiva das ondas, auxílios à navegação como faróis e boias e um canal de navegação melhorado para permitir a limpeza subaquática adequada para a passagem de embarcações. A capacidade dos portos e o desenvolvimento econômico do Brasil encontram-se inerentemente associados. O aumento da eficiência em muitos dos casos minimiza os custos e aperfeiçoa o padrão dos serviços portuários, ocasionando consequências positivas para a economia de forma geral (CORSON, 2007; DOS SANTOS; RODRIGUES, 2017).

A história portuária brasileira iniciou-se a partir das instalações elementares inseridas durante o período de colonização até os amplos complexos portuários e terminais especializados em atividade. Essa transformação conteve momentos de variações importantes, em 1808 com a permissão de acesso às “*nações amigas*” praticadas por Dom João VI, as primeiras autorizações para utilização dos portos públicos e das ferrovias no final do século XIX, em seguida, a inserção de terminais especializados determinantes e compatíveis com a industrialização do período pós-guerra como mecanismo de prioridade dos Planos Nacionais de Desenvolvimento (PND's) nos governos da ditadura militar (NETO; VENTILARI, 2001; MATTOS, 2017).

O modal marítimo é responsável por grande parte da movimentação de cargas no Brasil. Pesquisas elaboradas pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria comércio Exterior e Serviços (MDIC) retratam que o ramal aquaviário é o mais utilizado mundialmente. O Brasil possui uma costa navegável com cerca de 8,5 mil quilômetros, movimentando aproximadamente 700 milhões de toneladas dos mais diversificados artigos, respondendo, individualmente, aproximadamente 90% das exportações. Em relação aos custos de transporte, o modal aquaviário possui um dos mais baixos custos operativos, em desvantagem apenas para o transporte dutoviário e aéreo. Atualmente, a estrutura portuária brasileira é integrada por 35 portos administrados pela iniciativa pública (conforme ilustrado na Figura 2) entre fluviais e marítimos, onde são representados, outorgados ou operacionalizados por meio dos governos estaduais ou municipais, além do que, 173 terminas autorizados que atuam sob concessão à iniciativa privada (CODEBA, 2017).

Figura 2 – Distribuição geográfica dos portos brasileiros



Fonte: Adaptado de CODEBA (2017)

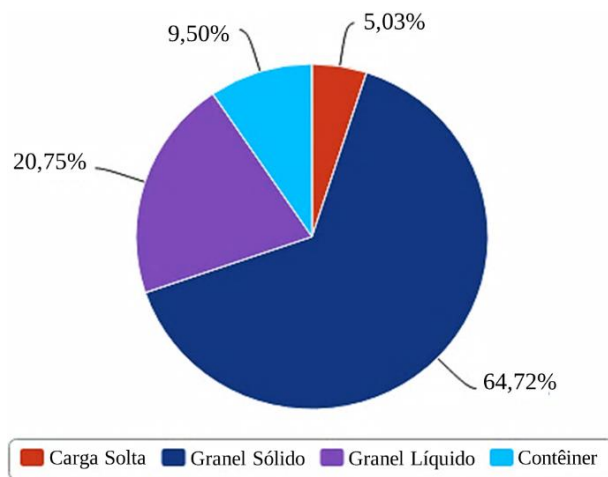
As funções e serviços portuários são verificados por uma sequência de perspectivas geográficas, políticas, econômicas e sociais. Do ponto de vista das políticas públicas, os portos são incentivadores econômicos nos lugares onde operam agregando serviços e atividades em benefícios econômicos e sociais. Outros aspectos incluem o planejamento e expansão urbana, segurança e sustentabilidade ambiental. A partir dessa base, os autores revelam que a exemplo de outros países, em geral, as cidades se desenvolveram nas adjacências das plantas portuárias construídas para o escoamento da produção (BICHOU; GRAY, 2005; SILVA et al., 2016).

Nos portos as cargas movimentadas podem ser classificadas em três categorias: granel sólido, líquido e carga geral. Soja, minério de ferro, açúcar e fertilizantes são exemplos de elementos categorizados como granel sólido. Os derivados do petróleo e produtos químicos em geral, óleos de soja e solventes são considerados graneis líquidos. Produtos diversos como madeira, frutas, bobina de papel e produtos alimentícios são considerados carga geral. Determinados portos marítimos destacam-se por conta da elevada movimentação, desempenho

satisfatório, infraestrutura adequada, localização e por implementar em seu sistema inovações tecnológicas (FALCÃO; ANDERSON, 2012).

Dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) apresentam a importância dos portos brasileiros para a recuperação da economia. A movimentação total de cargas nos portos obteve crescimento de 10 milhões de toneladas transportadas. As principais mercadorias movimentadas no país representam 80% do total geral, são elas: minério de ferro, combustíveis, óleos minerais, soja, bauxita, açúcar, produtos siderúrgicos, celulose, fertilizantes, farelo de soja e produtos diversos da indústria química. Na Figura 3 são representados o percentual da movimentação nacional realizada pelos portos em 2017, de acordo com a natureza da carga (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL, 2017).

Figura 3 – Participação percentual em relação dos tipos de carga



Fonte: Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (2017)

De acordo com o Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil - MTPA (2017) dos 146,3 milhões de toneladas de granel líquido, 83,6 milhões (57,1%) são referentes à movimentação de petróleo. Na mesma perspectiva, dos 456,35 milhões de toneladas de granel sólido, 256,86 milhões (56,3%) são referentes à movimentação de minério de ferro. Em relação à participação dos portos na movimentação, 35,31% referem-se aos portos públicos e 64,96% aos portos administrados por iniciativas privadas.

Entre as principais instalações de movimentação de cargas no país, o Terminal de Uso Privado (TUP) de Ponta da Madeira no Maranhão, destaca-se por ter possuído o maior volume movimentado, com 106.425.524 toneladas, ultrapassando o Terminal de Tubarão no Espírito

Santo com cerca de 71.344.232 toneladas em 2017. Em seguida, os portos de Santos em São Paulo com 69.736.095 toneladas e o porto de Sepetiba no Rio de Janeiro com 34.012.663 toneladas, respectivamente, conforme apresentado na Figura 4 (ANTAQ, 2017).

Figura 4 – *Ranking* da movimentação das cargas em portos públicos e privados



Fonte: Adaptado de ANTAQ (2017)

Nas últimas décadas, o modelo construído pela infraestrutura portuária apresentou problemas e deficiências que implicaram diretamente em sua eficiência e, em última análise, o respectivo avanço econômico. É requerido assegurar o desenvolvimento da infraestrutura terrestre e aquaviária nos portos, de maneira que o sistema possa de fato auxiliar no fortalecimento do comércio exterior nacional. Verifica-se que existe uma elevada burocracia e os portos brasileiros ainda não possuem a mesma capacidade que os asiáticos ou europeus, além da ausência de preparo e maiores investimentos para apoiar o aumento expressivo nas exportações (TOVAR; FERREIRA, 2006; VIEIRA et al., 2015).

A partir dessa base, Gonzalez e Trujillo (2008) revelam que os portos têm um importante papel na cadeia logística. A alta produtividade portuária conduz a custos menores e beneficiam a competitividade dos produtos nacionais em comércios internacionais. As etapas básicas para estruturação da medição de desempenho parte da definição dos custos, tempo, nível de serviço, qualidade, mapeamento dos processos funcionais, identificação dos elementos críticos e a concepção de padrões e metas. Com o propósito de sustentar uma posição competitiva no mercado internacional, os países devem concentrar-se nos aspectos que induzem a eficiência dos portos. A dinâmica e eficiência portuária não se limitam apenas às instalações e à capacidade de operação, mas também à disponibilidade dos equipamentos em todas as atividades.

2.2 A DISPONIBILIDADE OPERACIONAL DE EQUIPAMENTOS

Até a Segunda Guerra Mundial, a indústria não era altamente mecanizada, a maioria das máquinas e equipamentos eram simples e superdimensionadas e a consequência de uma falha em muitos casos era negligenciada. A manutenção foi considerada como uma tarefa de produção como um mal necessário. Após a Segunda Guerra Mundial, a escassez de mão de obra na indústria e o aumento da demanda de vários produtos levaram a uma maior mecanização das fábricas, que as tornaram mais complexas, a disponibilidade e o custo foram considerados fatores importantes para alcançar os objetivos dos negócios (ALSYOUF, 2007; GONÇALVES; LOPES, 2017).

No entendimento de Marson (2014), a indústria de máquinas e equipamentos é considerada um ramo chave no processo de industrialização e progresso econômico dos países, subsidiando máquinas e equipamentos que convertem os requisitos da função produção em bens e/ou serviços. Essa indústria é importante pois incorpora novos conhecimentos tecnológicos ao processo produtivo por meio da introdução de bens e capital que elevam a produtividade e a eficiência do sistema econômico.

Para Aita e Peixoto (2013), entre as atividades no cotidiano das empresas, o manejo de cargas é uma das mais frequentes e podem ser realizadas manualmente ou por intermédio de equipamentos. Independentemente do tipo, as movimentações de cargas requerem cuidados, pois a conduta de movimentação, manuseio, transporte e armazenagem, dentro ou fora das empresas, são agentes de graves acidentes. Ainda, deve-se projetar uma logística de movimentação de materiais e de armazenagem em locais adequados que propiciem sua distribuição entre as várias áreas da empresa.

As máquinas são caracterizadas como dispositivos formados por conjuntos mecânicos ou elétricos, assim como a junção de ambos, que acionados auxiliam na execução dos trabalhos. Para os autores, o funcionamento e operação depende de uma fonte de energia, classificadas como: elétrica, mecânica, hidráulica, térmica, pneumática e outras. Designam-se como equipamentos os instrumentos, aparelhos ou dispositivos que desempenham a função de auxílio na execução de uma tarefa, podendo ser realizada por máquinas ou manualmente, tais como transporte, urbano, esportivo e industrial, ou seja, de certa forma toda máquina é um equipamento, diferenciando-se basicamente na forma de utilização (AITA; PEIXOTO, 2013).

Fagundes et al. (2011) destacam que a operação por longos períodos de tempo e de modo eficaz dos sistemas produtivos de bens e serviços é um requisito substancial em muitos âmbitos. Nos serviços, como produção, transporte e distribuição de energia, as falhas inesperadas

originadas por condições arbitrárias devem ser compreendidas buscando evitar tanto danos econômicos e sociais. A indisponibilidade de equipamentos críticos pode interferir no desempenho industrial, o que poderá ser avaliado e controlado por indicadores adequados. Nem todas as falhas são igualmente catastróficas, a importância da falha é estabelecida por seu impacto no desempenho global do sistema produtivo.

A disponibilidade pode ser estimada utilizando diversos métodos e medidas, e com característica de sistemas reparáveis, assumindo que um item em falha poderá ser restaurado por meio da manutenção. Nas indústrias, estimar ou prever a disponibilidade de um sistema, onde a disponibilidade é definida como a probabilidade de que o sistema esteja em estado de operação em um tempo aleatório é de suma importância para o desempenho global. Os métodos de previsão e avaliação da disponibilidade podem fornecer medidas de desempenho quantitativas utilizadas na avaliação de alternativas que permitam a redução de custos, levando à definição de manutenção (ERICSON, 2015).

2.3 DEFINIÇÕES E HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO

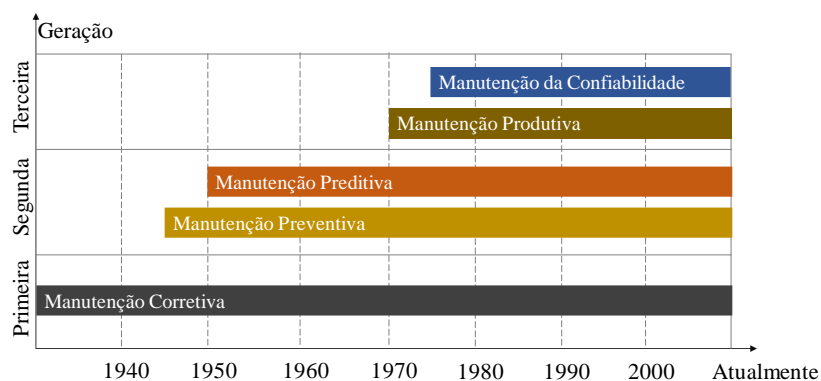
Ao longo dos anos, verificou-se que a manutenção passou a desempenhar uma função estratégica dentro das organizações modernas significando em um grande diferencial competitivo das empresas modelo em seus ramos. É competência da manutenção manter alto nível de confiabilidade e de disponibilidade dos equipamentos, seu propósito é garantir ao processo produtivo a disponibilidade dos equipamentos e instalações com qualidade, segurança, preservação ambiental, confiabilidade e custos adequados (PINTO; XAVIER, 2007; FACCHINI; SELLITTO, 2014).

Fogliatto e Ribeiro (2009) explicam que o foco da manutenção está na redução de falhas, centrada na confiabilidade e no redirecionamento de suas percepções. Existe uma grande conveniência na redução da probabilidade de ocorrências de falhas nos processos, o que ocasionou um crescente foco na confiabilidade com o uso de ferramentas de análise de falhas e busca constante na redução de suas recorrências. Consideravelmente, as análises de engenharia se fazem presentes em definições quantitativas e probabilísticas aplicadas aos processos que compõem as organizações.

O desenvolvimento da manutenção pode ser segmentado em três gerações. A primeira geração inclui o período anterior à Segunda Guerra Mundial, em que não era relevante uma manutenção sistemática, apenas serviços de lubrificação, limpeza e correção após a falha, denominada de Manutenção Corretiva. A segunda geração ocorreu no período da Segunda

Guerra Mundial até os anos 60, no qual houve um aumento da mecanização por conta da crescente demanda da produção e as indústrias passaram a ser mais complexas. Assim, evidenciou-se a necessidade de maior disponibilidade dependente do bom funcionamento das máquinas, levando a noção que as falhas dos equipamentos deveriam e seriam evitadas, derivando no conceito de Manutenção Preventiva. A terceira geração teve início a partir da década de 70, devido a quantidade de capital investido em itens físicos e com o aumento dos custos, levando as indústrias a desenvolverem meios para aumentar a vida útil dos equipamentos, originando o conceito de Manutenção Preditiva. Na Figura 5 apresenta-se a evolução temporal dos tipos de manutenção (PINTO; XAVIER, 2007; CARVALHO et al., 2015; DETREGIACHI FILHO et al., 2017).

Figura 5 – Evolução do processo de manutenção segundo as gerações



Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2015)

A manutenção ideal pode ser expressa como o alcance padrão da disponibilidade, qualidade do produto, padrões de segurança e o custo mínimo de recursos. No entanto, os custos podem ser difíceis de mensurar e os custos com a manutenção podem representar entre 10% a 40% dos custos de produção em uma empresa. Cerca de um terço dos custos da manutenção são considerados desnecessários devido à ineficiência do planejamento e controle, levando ao aumento dos custos de produção, falhas no sistema produtivo, perdas em tempo e volume, além de impactos negativos ao meio ambiente e clientes (TODINOV, 2006; PINTO; XAVIER, 2007).

A partir dessa base, Siqueira (2005) e Facchini e Sellitto (2014), revelam que a manutenção está vinculada ao grau de êxito econômico das empresas influenciando na qualidade do produto, na capacidade de produção e nos custos operacionais dos equipamentos. As atividades de manutenção promovem o aumento do desempenho e disponibilidade dos

equipamentos para a produção, entretanto, contribuem para ampliar os custos de operação. O propósito da manutenção é certificar-se que as unidades físicas permaneçam a desempenhar o planejado, além de atingir uma estabilidade entre os defeitos, maximizando a contribuição econômica da organização.

2.4 OS MÉTODOS DE MANUTENÇÃO

Existem diferentes maneiras de especificar os diversos métodos da manutenção. Os tipos de manutenção são classificados conforme os procedimentos adotados pelos usuários em relação às falhas. Existem quatro categorias básicas de manutenção normalmente classificadas em manutenção corretiva, manutenção preventiva, manutenção preditiva e manutenção detectiva (SANTOS, 2010).

Uma pesquisa elaborada pela Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN) demonstra que, em geral, os custos das indústrias com manutenção correspondam cerca de 4,69% sobre o faturamento bruto das empresas, destacando a necessidade do investimento em manutenção corretiva. Dados do Documento Nacional retratam que as empresas aplicam cerca de 28,69% do tempo dos seus trabalhos em ações corretivas, 36,27% em preventivas, 17,97% em ações preditivas e 17,07% em detectivas dentre outras (ABRAMAN, 2013).

2.4.1 Manutenção Corretiva

Denomina-se de manutenção corretiva a atividade efetuada logo após a ocorrência de uma falha, atribuída a repor um equipamento em condições de execução da função requerida. É adequada quando não for exercida uma manutenção preventiva. O impacto da indisponibilidade do equipamento é menor que a manutenção preventiva. A manutenção corretiva pode ser dividida em duas fases: a corretiva não planejada, que é a correção da falha de maneira aleatória, e a planejada, sendo a correção que se faz em função de acompanhamento da operação do equipamento até a ocorrência da falha (OTANI; MACHADO, 2008).

2.4.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é realizada periodicamente, deve ser a atividade principal de manutenção em qualquer organização envolvendo tarefas sistêmicas como as inspeções,

reformas e substituições de peças ou componentes. Nessa modalidade, ocorre a diminuição da frequência das falhas, a disponibilidade dos equipamentos aumenta e os eventos inesperados diminuem, ou seja, a manutenção preventiva evita a ocorrência de falhas por intermédio da substituição de partes do sistema (XENOS, 2014).

Para executar a manutenção preventiva (MP) em grupos de equipamentos adota-se uma política de manutenção em que são considerados os custos do tempo de parada, ajustes e quantidade de eventos, objetivando identificar com qual frequência devem ser realizadas as intervenções para minimizar os custos de quebras e da manutenção preventiva (SOUZA, 2011). A forma matemática do modelo de custos da MP é representada na equação (1):

$$Bn = N \left(\sum_1^n p_n \right) + B_{(n-1)} p_1 + B_{(n-2)} p_2 + \dots + B_1 p_{(n-1)} \quad (1)$$

Onde: Bn = número esperado de quebras para cada uma das políticas de manutenção preventiva, Pn = probabilidade de que uma quebra ocorra entre inspeções de MP quando efetuada em n períodos, N = número de máquinas no grupo em estudo.

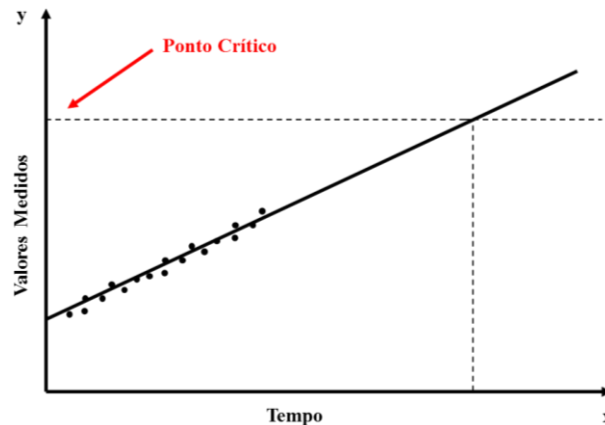
2.4.3 Manutenção Preditiva ou Condicionada

Quando se observa apenas os custos, a manutenção preditiva é uma das categorias mais dispendiosa, pois os componentes dos equipamentos são substituídos antes de completarem seus limites de vida. Conceitua-se como manutenção preditiva um conjunto de tarefas de monitoramento dos parâmetros ou variáveis que retratam a performance dos equipamentos. Essa manutenção permite que os equipamentos operem por mais tempo e a intervenção ocorre com base em dados e não em suposições. O advento da tecnologia favoreceu diretamente o desenvolvimento das técnicas de manutenção preditiva, tais como análise de vibração, acústica, exames estruturais, termometria e fenômenos de viscosidade. Após a análise dos fenômenos e das condições, adota-se um procedimento para acometer os problemas identificados efetuando uma análise de tendências (XENOS, 2014).

A análise da tendência constitui-se no acompanhamento, nas medições periódicas e nas contínuas de um ou vários critérios que indicam a situação de desempenho do equipamento. Nesse caso, é preciso selecionar com critério os parâmetros definidores do estado e a condição do equipamento de forma que as indicações obtidas possam corresponder às expectativas postas no sistema. O tempo que decorrerá até a ocorrência da falha é a principal vantagem da utilização

da técnica diante dos valores avaliados em pressupor com antecedência a falha ou avaria, por intermédio de mecanismos que atuam na supervisão frequente predizendo a necessidade do reparo (SOUZA, 2011). Na Figura 6 pode ser observado o período crítico para manutenção dos equipamentos.

Figura 6 - Controle preditivo dos equipamentos



Fonte: Adaptado de Souza (2011)

A reta da tendência ou de correlação $y = a + bx$ pode indicar uma data (x) provável de falha do equipamento conforme os valores medidos (y) e o ponto crítico. Recomenda-se que a intervenção seja realizada de maneira preventiva no período próximo a um terço do ponto crítico em relação à partida de y com $x = 0$. Dessa forma, empiricamente obtém-se a manutenção preditiva auxiliando na determinação de um plano preventivo não periódico. Para maior confiança no tempo crítico definido pelo gráfico é necessário possuir o coeficiente de correlação, em módulo, maior que 0,75 (SOUZA, 2011).

2.4.4 Manutenção Detectiva

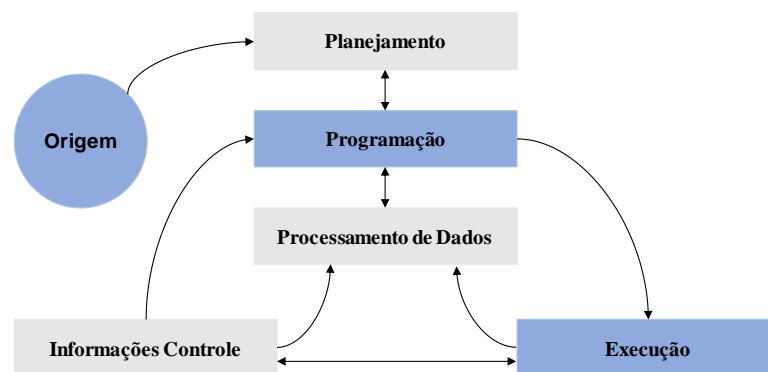
A manutenção detectiva tem como finalidade elevar a confiabilidade dos equipamentos, caracterizada pela intervenção em sistemas de proteção, identificação de falhas ocultas e não perceptíveis no momento da inspeção por parte da operação. Sua aplicação se faz necessária quando o nível de automação dentro das indústrias aumenta ou quando o processo é crítico, não admitindo falhas. O objetivo da manutenção detectiva é permitir a operação contínua dos equipamentos pelo maior tempo possível, interferindo o mínimo na planta industrial. A inspeção de equipamentos é responsável por manter as condições operacionais por meio da

identificação de falhas ou de defeitos prematuros para cabíveis correções, obedecendo um planejamento elaborado para cada nível de conhecimento técnico e operacional (XENOS, 2014).

2.5 GESTÃO ESTRATÉGICA DA MANUTENÇÃO

A manutenção como atribuição estratégica das organizações é encarregada pela disponibilidade de ativos e tem importância capital nos resultados da empresa. Os métodos organizacionais possibilitam o ideal exercício da manutenção, pois as técnicas de planejamento e controle, os índices de qualidade e o sistema de gerenciamento constituem as bases da estruturação da manutenção industrial de uma empresa. Observa-se na Figura 7 o ciclo de gerenciamento dos serviços de manutenção (OTANI; MACHADO, 2008; SOUZA, 2011).

Figura 7 – Ciclo gerencial da manutenção dos serviços



Fonte: Adaptado de Souza (2011)

A garantia da qualidade na manutenção, do mesmo modo que decorre em todos os setores gerenciais, está sendo administrada nos níveis estratégico, tático e operacional. O gerenciamento do processo de manutenção dos equipamentos é realizado a partir da identificação das falhas, com um monitoramento contínuo, a fim de identificar os índices de ocorrências dessas falhas, avaliando suas influências no processo operacional, nos custos, na segurança e nas implicações ambientais (PEREIRA, 2010).

No entendimento de Souza (2011), no nível estratégico são tomadas decisões sobre as definições políticas e interações com o ambiente externo da empresa, principalmente pela alta direção política do setor de manutenção, tais como compra de equipamentos, estrutura organizacional, gerenciamento da eficiência da produtividade e outros. No nível tático, as

decisões tomadas são em relação ao fluxo do trabalho, são desenvolvidas atividades de acompanhamento do cronograma, análise de indicadores, controle dos custos e assim por diante. Enquanto no nível operacional são realizadas atividades de controle e de decisões tomadas sobre informações relativas à execução dos trabalhos, são desenvolvidas atividades de análise de falhas, implantação de melhorias, emissão de ordens de serviços e outros.

O gerenciamento da manutenção se tornou importante em todo sistema industrial. Os principais desafios da gestão da manutenção são: a alta disponibilidade das instalações, a elevada produtividade organizacional, a seleção adequada dos indicadores de desempenho e os baixos custos diretos de manutenção. Com a evolução da gestão da manutenção, é possível adquirir equipamentos específicos para determinada área operacional. Com a utilização de novas técnicas e ferramentas de aferição, pode-se chegar à confiabilidade total, tendo como resposta a disponibilidade satisfatória dos equipamentos a um menor custo (MENDONÇA; CHUN; ROCHA, 2017).

Para monitorar as programações de manutenção e analisar os resultados das atividades do setor de manutenção, utiliza-se indicadores como elementos de controle. A elaboração, o método de cálculo, as definições e a utilização de indicadores de controle podem diferir de acordo com cada empresa e precisam ser monitoradas pois mensuram a eficiência e a eficácia das equipes de manutenção (VIANA, 2002; NARA et al., 2013).

Os indicadores de desempenho são dados estatísticos referentes a um processo de manutenção no qual pretende-se controlar com a determinação de padrões e objetivos. Grande parte dos problemas de manutenção envolve variáveis aleatórias. Os indicadores de manutenção são definidos como uma grandeza que fornece indicações sobre as condições dos equipamentos, retratam aspectos importantes do processo da planta industrial propondo melhorias. Existem alguns indicadores utilizados em grande parte do mundo, são eles: *Mean Time Between Failures* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR) e o Tempo Médio para Falha (TMPF) (MENDES; RIBEIRO, 2011).

O tempo médio entre falhas é definido como a razão da soma das horas disponíveis do equipamento para a operação (HD), pelo número de intervenções corretivas no equipamento no período (NC), conforme a equação (2) (VIANA, 2002; WUTTKE; SELLITTO, 2008):

$$MTBF = \frac{HD}{NC} \quad (2)$$

Esse indicador é utilizado para analisar o desempenho do equipamento em relação às ações da manutenção. Se o valor do MTBF ao longo do tempo aumentar, há, portanto, um indício positivo para manutenção, sinalizando que as quantidades de intervenções estão diminuindo e obtém-se maior disponibilidade operacional (KRASICH, 2009). Ainda segundo o autor supracitado, o MTTR é dado pela razão entre a soma das horas de indisponibilidade para a operação devido à manutenção (HIM) pelo NC, de acordo com a equação (3):

$$MTTR = \frac{HIM}{NC} \quad (3)$$

Para Viana (2002) e Wuttke e Sellitto (2008), existem determinados componentes que são substituídos por novos, após apresentarem falhas sem recondicionamento e dessa maneira, possuem um MTTR igual a zero. A perspectiva do tempo médio para a falha é, nesse tipo de componente, considerada a relação entre o HD pelo número de falhas detectadas em componentes reparáveis, conforme apresentado na equação (4):

$$TMPF = \frac{HD}{N^{\circ} \text{ de Falhas}} \quad (4)$$

Vale ressaltar que o TMPF e o MTBF são distintos pelo fato de levar em consideração falhas em componentes reparáveis e não reparáveis (KRASICH, 2009).

2.6 CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

Com sistemas produtivos cada vez mais complexos, as empresas tendem a explorar todas as vantagens competitivas possíveis com o objetivo de encontrar o potencial em cada processo. Um sistema de produção de alto desempenho não depende apenas de um modelo operacional eficaz, mas também dos processos para manter o sistema. A manutenção é um aspecto fundamental na confiabilidade industrial. A manutenção eficiente consiste em inspeções oportunas, revisões, testes, renovações e ajustes regulares proporcionando a redução do número de falhas e a ampliação da vida útil do sistema (SALONEN; MATS, 2011).

A pouco mais de 50 anos, o método de confiabilidade em sistemas técnicos vem sendo executado, adquirindo um significado tecnológico após o término da Primeira Guerra Mundial quando foi utilizado para retratar estudos comparativos realizados em aviões com um, dois ou

quatro motores sendo mensurada pelo número de falhas por hora de operação (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

O principal objetivo de todo conjunto da manutenção é tornar mínima a relação entre custos e benefícios. A metodologia da Manutenção Centrada na confiabilidade (*RCM – Reliability Centered Maintenance*) busca o desenvolvimento de programas de manutenção que minimizem as consequências de falhas em equipamentos. Os princípios básicos envolvem a identificação de modos de falhas funcionais, hierarquização das falhas, as consequências para o sistema e a seleção de ações preventivas. A RCM é um agrupamento de artifícios que se tornaram significantes no sentido de detectar os inúmeros elementos que favorecem a não-confiabilidade de um equipamento, bem como os procedimentos adotados para implementar sua confiabilidade (MOSLEMI et al., 2016).

2.6.1 Funções de Confiabilidade

Existem diversos critérios de confiabilidade para uma unidade não reparável, em que uma unidade pode designar um equipamento, componente ou sistema. Os critérios mais utilizados são: a função de confiabilidade $R(t)$, a função de risco $h(t)$ e a função de vida residual média $L(t)$ (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). A função de confiabilidade $R(t)$ informa a probabilidade de um equipamento ou sistema apresentar ausência de falhas no intervalo de tempo $(0, t)$ e ainda estar funcionando no tempo t . A função de confiabilidade $R(t)$ é também denominada função de sobrevivência conforme a equação (5):

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} = \frac{n_s(t)}{n_0} \quad (5)$$

A função de risco $h(t)$ também conhecida como taxa de falha, pode ser considerada como a medida de confiabilidade mais difundida na prática, é compreendida como a quantidade de risco associada a uma unidade de tempo t condicionada a um evento, representada pela equação (6).

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t | T \geq t) = \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t)}{P(T \geq t)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (6)$$

A dimensão da medida em função do risco é normalmente concedida em termos de falhas por unidade de tempo. O modo da função de risco é um indicativo da forma como um

equipamento envelhece. O modo da função de risco é um indicativo da forma como um equipamento envelhece visto que pode ser interpretada como a quantidade de risco a que uma unidade está exposta em um tempo t , onde um valor pequeno para a função implica uma unidade exposta a uma menor quantidade de risco (SCAPIN, 2014). A função de vida residual média corresponde à vida remanescente esperada da unidade, dado que ela sobreviveu até o tempo t é designada pela equação (7):

$$L(t) = E[T - 1|T \geq t], t \geq 0 \quad (7)$$

O valor esperado não-condicionado da distribuição T , $E(T)$, é um caso especial da função $L(t)$, quando $t = 0$ (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

2.6.2 Distribuições de Probabilidade em Manutenção

A modelagem dos tempos de falhas é central em estudos de confiabilidade. A definição mais usual de confiabilidade de um equipamento é dada em termos de sua probabilidade de sobrevivência até um tempo t de interesse. A determinação de tal probabilidade é possível por meio da modelagem dos tempos até a falha do equipamento. Conhecendo-se a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta a esses tempos, é possível estimar a probabilidade de sobrevivência do equipamento para qualquer tempo t bem como outras medidas de confiabilidade. As distribuições mais utilizadas em confiabilidade para descrever tempos até falha são: Distribuição Exponencial, Lognormal, Gama e Weibull (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

2.6.2.1 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é assim denominada por conta da função exponencial na função densidade de probabilidade. É uma distribuição contínua com função de risco constante. A representação da mesma para um $t \geq 0$, onde λ é a frequência média de sucessos por unidade de observação é apresentada pela equação (8) (MONTGOMERY; RUNGER, 2016).

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (8)$$

A variável aleatória x , que é igual à distância entre contagens sucessivas de um processo de Poisson, com média $\lambda > 0$ é uma variável aleatória exponencial com parâmetro λ . A função de confiabilidade $R(t)$ e função de risco $h(t)$ são representadas nas equações (9) e (10) respectivamente.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (9)$$

$$h(t) = \lambda \quad (10)$$

A distribuição exponencial é caracterizada por alterações na taxa de falha constante, nos tempos de falha (t) e refere-se à mensuração de tempo ou espaço, tendo como exemplo a duração de vida e dos quilômetros percorridos (MONTGOMERY; RUNGER, 2016).

2.6.2.2 Distribuição Lognormal

A lognormal é utilizada na modelagem de tempos até ajustes nos equipamentos reparáveis, ou seja, em componentes que durante o tempo de operação apresentam desgastes em sua estrutura. Variáveis em um sistema seguem em alguns casos uma relação exponencial como $t = \exp(w)$. Um caso especial ocorre quando W tem uma distribuição normal, no caso a distribuição T é chamada de uma distribuição lognormal. A distribuição lognormal tem propriedades reprodutivas multiplicativas (MONTGOMERY, 2017). As medidas de confiabilidade de interesse para a distribuição lognormal $t \geq 0$, são apresentadas nas equações (11), (12) e (13) respectivamente:

$$f(t) = \frac{1}{x\omega\sqrt{2}} \exp\left[-\frac{(\ln(t) - \theta)^2}{2\omega^2}\right] \quad (11)$$

$$R(t) = \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right) \quad (12)$$

$$h(t) = \frac{\phi[(\mu - \ln t)/\sigma]/\sigma t}{\Phi[(\mu - \ln t)/\sigma]} \quad (13)$$

Onde $\Phi(t)$ é o valor da função de distribuição da normal padronizada avaliada em t , $\phi(t)$ é o valor da função de densidade da distribuição normal padronizada avaliada em t , μ corresponde à média do logaritmo, σ ao desvio padrão do logaritmo e t ao tempo até a falha (HINES et al., 2011; MONTGOMERY, 2017).

2.6.2.3 Distribuição Gama

A distribuição gama é uma generalização da distribuição exponencial. É também utilizada em estudos de sobrevida na confiabilidade podendo descrever o tempo de um equipamento falhar. A medida de confiabilidade de interesse para a distribuição gama ($t \geq 0$) a variável aleatória t , com função de probabilidade, confiabilidade e risco são apresentadas nas equações (14), (15) e (16) respectivamente (MONTGOMERY, 2018; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\gamma)} (\lambda t)^{\gamma-1} e^{-\lambda t} \quad (14)$$

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^{\lambda t} x^{\gamma-1} e^{-x} dx \quad (15)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (16)$$

Em que Γ é a função gama, e os parâmetros λ e γ são frequentemente denominados de parâmetros de escala e forma, respectivamente (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; MONTGOMERY, 2018).

2.6.2.4 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é comumente utilizada na confiabilidade para empregar o tempo até a falha de diferentes equipamentos para $t \geq 0$. Os parâmetros na distribuição fornecem uma grande flexibilidade para modelar sistemas em que os eventos de falhas aumentam, diminuem ou permanecem constantes ao passar do tempo. A variável aleatória T , com função densidade de probabilidade, confiabilidade e risco, é representada pelas equações (17), (18) e (19) respectivamente.

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t - t_0}{\theta} \right)^{\gamma-1} e \left[- \left(\frac{t - t_0}{\theta} \right)^\gamma \right] \quad (17)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\theta} \right)^\gamma} \quad (18)$$

$$h(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t - t_0}{\theta} \right)^{\gamma-1} \quad (19)$$

No qual t_0 é o tempo livre de falha, t representa o tempo até a falha, $\theta > 0$ o parâmetro de escala e $\gamma < 0$ o parâmetro de forma (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; HINES et al., 2011; MONTGOMERY, 2018).

2.7 ESTUDOS DE ANÁLISE DE SOBREVIDA

Na fase inicial desta pesquisa quando se realizou a revisão da literatura, constatou-se a escassez de trabalhos de Análise de Sobrevida aplicada em equipamentos industriais quando consultados nas bases de periódicos da *Scopus*, *Web of Science*, *Scielo*, *Emerald Insight*, *SciFinder* e *Academic Search Premier*. Observou-se diversas pesquisas na área da saúde, mas poucas na área de Engenharia de Produção. Nesse sentido, neste texto buscou-se resumir uma contribuição à compreensão da metodologia da Análise de Sobrevida como uma abordagem geral.

Com o propósito de constituir uma revisão sobre análise de sobrevida, no Quadro 1, apresentam-se as principais informações acerca de estudos sobre o objeto desta pesquisa. Como critério de seleção, considerou-se artigos publicados em periódicos dos últimos 10 anos que

abordam o desenvolvimento ou aplicação dos métodos de análise de sobrevivência, tanto em cenários teóricos como práticos.

A combinação dos termos de busca da pesquisa foi realizada utilizando as expressões booleanas “AND” e “OR”, com as seguintes palavras-chaves: “*Survival Analysis*”, “*Cox Regression*”, “*Kaplan-Meier*”, “*Industrial Equipment*”, “*Maintenance Management*”, “*Failures*”, “*Industrial Faults*”, “*Equipment Failures*”.

Quadro 1 – Estudos sobre Análise de Sobrevivência na área de Engenharia de Produção

Autor	Local	Ano	Periódico	Título
Andreozzi e Carvalho	Lisboa	2011	SPE	Sobrevivência de múltiplos eventos
Machado	Lisboa	2011	SPE	O estimador de Kaplan-Meier: Novos desenvolvimentos e aplicações no contexto da análise de sobrevivência multiestado
Madeira, Infante e Didelet	Portugal	2013	REVSTAT Statistical Journal	Use of survival models in a refinery
Khalaf et al.	África do Sul	2013	Journal of Engineering, Design and Technology	The effect of maintenance on the survival of medical equipment
Goyal, Whelan e Cavalline	Charlotte	2016	Structure and Infrastructure Engineering	Characterising the effect of external factors on deterioration rates of bridge components using multivariate proportional hazards regression
Jung e Oh	Coréia	2017	Journal of Transportation Engineering	Lifespan Evaluation of Traffic Detector for Automated Traffic Recorders Based on Weibull Distribution

Fonte: Elaborado pelo autor

O principal objetivo da pesquisa realizada por Andreozzi e Carvalho (2011) foi difundir a linguagem estatística dos modelos de sobrevivência aplicados a eventos múltiplos. Em muitas situações, o interesse não está relacionado a um único tipo de evento, mas a diferentes tipos decorrentes de um mesmo fator de risco. A principal característica da análise de sobrevivência de eventos múltiplos é que para cada indivíduo registra-se em mais de um tempo, nesse caso, a utilização direta do modelo de riscos proporcionais de Cox não é adequada, mesmo utilizando a formulação por processo de contagem, pois os intervalos de tempo de um mesmo indivíduo

podem se sobrepor. A abordagem geral foi apresentar os modelos marginais, que são extensões do modelo de Cox.

No trabalho de Machado (2011) foi realizada uma revisão de literatura sobre diferentes representações para o estimador Kaplan-Meier, estudo de estimadores para probabilidades de transição, o estimador de Aalen-Johan e os estimadores não Markovianos. Foram apresentados os estimadores de transição podendo ser utilizados como função de distribuição bivariada para tempos sequenciados censurados. A partir dessa base, o autor afirma que os novos estimadores para as probabilidades de transição são consistentes, independentemente da condição de Markov.

Madeira, Infante e Didelet (2013) realizaram um estudo em turbinas de expansão, utilizadas como fonte de refrigeração dos processos industriais na refinaria de Sines em Lisboa, com o objetivo de aplicar um modelo de Cox em equipamentos específicos, buscando variáveis do processo que causavam vibrações, bem como aplicar distribuições conhecidas à taxa de risco de linha de base. Várias abordagens foram testadas e as avaliações para diferentes modelos foram avaliadas, embora nem todas elas pudessem ser utilizadas. Madeira, Infante e Didelet (2013) concluíram que algumas covariáveis, como área de superfície, devem ser definitivamente monitoradas, além da tendência de temperaturas de entrada e de exaustão do sistema em estudo. Houve indícios de que o sódio, o magnésio e o ferro são variáveis que influenciam para o aumento do risco de elevadas vibrações.

Khalaf et al. (2013) investigaram a disponibilidade de equipamentos médicos com base nos vários tipos de manutenção, apresentando modelo matemático de manutenção sobre a probabilidade de sobrevivência dos equipamentos. Foi proposto um modelo global para medir os parâmetros de equipamentos disponíveis, utilizando dados reais extraídos do histórico de manutenção de bombas de infusão e ventiladores usando o Matlab. Para confirmar a validade do modelo desenvolvido, a abordagem de análise de sobrevivência foi utilizada para mensurar a sobrevivência do equipamento em função da manutenção e da idade. Para Khalaf et al. (2013), a análise de sobrevivência aplicada na manutenção de equipamentos é benéfica e pouco explorada pelas indústrias. O modelo conduziu a conclusão que a idade do equipamento não tem efeito sobre a sobrevivência do equipamento. Isso pode ser atribuído ao número limitado de anos de serviço, em que o tempo de vida esperado de tal equipamento é de 10 a 15 anos.

Goyal, Whelan e Cavalline (2016) realizaram um estudo no qual desenvolveram uma metodologia baseada na regressão de risco proporcional para identificar os fatores críticos que afetam a deterioração de pontes. A estrutura desenvolvida foi implementada em avaliações de condições históricas de componentes e de superestruturas no inventário de pontes do estado da

Carolina do Norte, EUA contemplando 17.000 observações. Os resultados fornecem informações sobre a extensão em que os fatores explicativos influenciam nas taxas de deterioração ao longo do ciclo de vida dos componentes estruturais. Essa análise pode ser utilizada para desenvolver modelos de deterioração multivariada e informar as estratégias de tomada de decisão e priorização de projetos, de substituição, de reabilitação e de preservação das pontes.

No trabalho desenvolvido por Jung e Oh (2017), as distribuições Normal, Gama, Lognormal e Weibull foram ajustadas usando histórico de manutenção de sensores de trânsito automático (*Automatic Traffic Sensors - ATR*) *Piezo* e *Loop* indutivo, instalados em uma rodovia monitorada por cinco anos. Foram registrados um total de 1.179 observações para sensor *Piezo* e verificou-se que as falhas ocorreram após 10 meses, com 789 sensores com mais de 5 anos de vida. Um total de 1.219 observações do sensor *Loop* indutivo foram monitorados e 881 deles sobreviveram mais de 5 anos. A análise foi realizada utilizando o *software* R. A vida média do sensor *Piezo* foi de 71,05 e do sensor *Loop* 79,92 meses, respectivamente, concluindo que os sensores *Loop* têm uma vida relativamente maior que os sensores *Piezo*.

2.8 ANÁLISE DE SOBREVIDA

A análise de sobrevida, também denominada de análise de sobrevivência, é um dos campos da estatística que mais desenvolveu-se nas últimas décadas do século passado. Uma das razões para esse desenvolvimento é o melhoramento contínuo de métodos estatísticos atrelados à tecnologia da informação. Pode-se confirmar tal evidência quantitativamente pelo número de aplicações de análise de sobrevida na área da saúde (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

A ação de estruturação do modelo relativo consiste em retratar o vigor da ocorrência como função de variáveis explicativas no qual procura-se compreender as consequências de cada uma delas e suas interações, isento da existência de confusão. Os procedimentos incluídos são análogos ao de uma análise que utiliza a regressão logística, mas o foco é a ocorrência e não de risco. O modelo de sobrevida, como qualquer modelo de regressão, é composto por uma variável resposta, covariáveis explicativas, a função de ligação e a estrutura de erro (CARVALHO et al., 2011).

Os estudos clínicos são frequentemente prospectivos e de longa duração. Mesmo sendo longas, as pesquisas de sobrevida usualmente terminam antes que todos os indivíduos venham a falhar. Uma característica decorrente dessas pesquisas é, então, a presença de censuras, que podem dar-se por uma variedade de motivos, dentre elas, a perda de acompanhamento do

indivíduo no transcorrer do estudo e a não-concorrência do evento de interesse até o término do experimento (BATTISTELLA, 2008).

A análise de sobrevida é estabelecida por uma associação de métodos estatísticos para analisar dados que consistem nos tempos até a incidência de um evento de interesse, geralmente denominado tempo de vida ou tempo de sobrevida. Um problema encontrado na análise de sobrevida ocorre na falta de dados em um ou mais fatores considerados de risco. A estratégia, usualmente utilizada para esse problema, é simplesmente excluir esses dados da análise. Além de ser um desperdício de dados coletados, tal prática pode levar a resultados inválidos, uma vez que o grupo excluído pode ser justamente o problema em análise. Pode-se observar no Quadro 2 as principais características da análise de sobrevida (LINS; FIGUEIREDO; ROCHA, 2017).

Quadro 2 – Características gerais da análise de sobrevida

Elemento	Descrição
Variável Dependente	Tempo até a ocorrência de um evento
Evento Investigado	Falha
Tempo Inicial	Momento de início do estudo
Escala de Medida	Tempo real (anos, meses, semanas, dias)
Dados	Censurados
Teste de Hipóteses	Log-rank

Fonte: Adaptado de Lins, Figueiredo e Rocha (2017)

A presença de observações censuradas distingue a análise de sobrevida de outros tipos de análise, sem a presença de censura, os métodos estatísticos clássicos, como análise de regressão e planejamento de experimentos, poderiam ser empregados possivelmente utilizando uma modificação para a resposta. Adverte-se para o fato de que, mesmo censurados, todos os resultados derivados de um estudo de sobrevida precisam ser usados na análise estatística. Duas causas esclarecem o artifício: (a) mesmo sendo incompletas, as observações censuradas oferecem informações sobre o tempo de vida de equipamentos; (b) a omissão das censuras no cálculo das estatísticas de interesse pode ocasionar conclusões viciadas (PAGANO; GAUVREAU, 2004; SILVEIRA; COLOSIMO; PASSOS, 2010).

Os tempos de sobrevida podem ser limitados por um tempo inicial e um final, de modo que o experimento tem o início definido e terminará em um futuro próximo. O tempo de sobrevida apresentado pelos indivíduos durante o decorrer do experimento pode sofrer variações aleatórias. Assim como qualquer outra variável aleatória, os tempos de vida podem

ou não seguir uma distribuição de probabilidade conhecida. Para esses casos, utiliza-se métodos paramétricos para estimar os parâmetros de interesse, e, em caso contrário, métodos não paramétricos são adotados. Para as curvas de sobrevida considera-se a quantidade de dias que os equipamentos ficaram sem falhar, a condição final do equipamento, a falha ou a censura (CLARK et al., 2003; COLOSIMO; GIOLO, 2006; CARVALHO et al., 2011).

Em vários aspectos a análise de sobrevida difere da análise estatística clássica. A variável dependente será o tempo até ocorrência do evento em estudo, ao contrário da análise estatística clássica, em que a ocorrência do evento é a variável dependente. Devido à diferença do tipo de variável dependente os métodos clássicos não podem ser empregados na análise de sobrevida, pois a mesma possui métodos próprios na forma de exposição dos resultados e para os testes de significância, conforme apresentado no Quadro 3 (BOTELHO; SILVA; CRUZ, 2009; HARRELL JR; FRANK, 2015).

Quadro 3 – Comparação de algumas medidas estatísticas segundo a abordagem de análise

	Análise Estatística Clássica	Análise de Sobrevida
Medidas de Associação	<i>Odds Ratio</i> , Risco Relativo	<i>Hazard Ratio</i>
Apresentação de resultados	Gráficos descritivos, Descrição tabular	Estimador Kaplan-Meier, Método atuarial
Teste de Significância Univariada	Teste <i>t-student</i> , Análise de Variância, Teste χ^2	Teste Log-rank, Teste Breslow, Teste Tarone-Ware
Teste de Significância Multivariada	Regressão Logística	Regressão de Cox

Fonte: Adaptado de Botelho, Silva e Cruz (2009)

Botelho, Silva e Cruz (2009) destacam que a vantagem da análise de sobrevida é viabilizar o aproveitamento das informações de todos os equipamentos até o instante em que manifestam o evento e avaliar o ritmo que os eventos vão ocorrendo nos diferentes grupos. À vista disso, a análise de sobrevida é o recurso ideal para analisar resultados binários em estudos longitudinais que se caracterizam pela diferença entre os tempos de progressão dos equipamentos.

Andreozzi, Carvalho (2011) destacam como elemento importante dentro do estudo de sobrevida o tempo, constituído por três aspectos: o tempo inicial, a escala de medida e a falha. Nesse contexto, o tempo é utilizado para analisar o intervalo até o evento. Na definição dos diferentes tipos de eventos, os modelos de sobrevida podem assumir somente um evento de

interesse adequado para situações em que o evento ocorra apenas uma vez no período observado.

O que torna a análise de sobrevivência a única abordagem em algumas situações, condiz com o tipo de dados envolvidos e as conseqüentes limitações na sua escolha. Habitualmente, qualquer variável pode ser medida instantaneamente, no entanto, existem situações que o estudo é finalizado por diferentes questões antes da ocorrência do evento pesquisado. Em ambas situações, o conhecimento é que o evento ocorrerá entre dois instantes, dessa forma, entende-se que as observações são censuradas. As classificações da ausência de observação nos eventos são apresentadas no Quadro 4 (PAPOILA, 2011).

Quadro 4 – Tipos e características das censuras

Tipo de Censura	Características
Censura à direita	O evento não foi observado no período de acompanhamento
Censura à esquerda	O evento ocorreu antes do período final do estudo
Censura intervalar	O evento ocorreu em um intervalo de tempo
Censura informativa	O dado observado deixa o estudo por razões do evento
Censura não informativa	A perda da informação não se relaciona com o evento

Fonte: Elaborado a partir de Papoila (2011)

Mesmo que as informações sejam censuradas ou incompletas, observa-se que na análise de sobrevivência todos os dados são utilizados pois fornecem informações sobre o tempo de vida dos objetos em estudo e a omissão desses dados na modelagem estatística conduziria a conclusões enviesadas. É importante avaliar que os elementos necessários sejam coletados de forma adequada para aplicação do modelo estatístico no estudo, o tempo de falha e as censuras são os elementos típicos dos dados de sobrevivência (ABREU; NETO, 2013).

Como qualquer modelo de regressão a análise de sobrevivência é composta da variável resposta (representada pela probabilidade de sobrevivência, taxa de incidência e taxa acumulada), covariáveis explicativas, função de ligação e a estrutura de erro. Na análise de sobrevivência, as funções mais importantes são: função densidade de probabilidade $f(t)$, função de sobrevivência $S(t)$ e função de risco Hazard $h(t)$ (CARVALHO et al., 2011).

Em relação à função densidade de probabilidade, Carvalho et al. (2011) consideram o tempo de sobrevivência (T) a variável aleatória contínua positiva, correspondendo ao tempo até o acontecimento do evento de interesse, matematicamente $f(t)$ é representada pela equação (20):

$$f(t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{P(t \leq T < t + \varepsilon)}{\varepsilon} \quad (20)$$

Onde ε corresponde um acréscimo de tempo infinitamente curto.

A função de sobrevivência $S(t)$ é definida como a probabilidade de uma observação em análise não falhar em um tempo t , ou seja, a probabilidade de um equipamento sobreviver além do tempo t estabelecido (COLOSIMO et al., 2002; COLOSIMO; GIOLO, 2006). A função é definida de acordo com a equação (21):

$$S(t) = Pr(T > t) \quad (21)$$

A equação da função de sobrevivência é o complemento da função de distribuição acumulada $F(t) = 1 - S(t)$.

No entendimento de Carvalho et al. (2011) a função de risco $h(t)$, também denominada de taxa de falha, pode assumir qualquer valor real maior que 0 e possui unidade t^{-1} , definida pela equação (22) :

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t} \quad (22)$$

A função de Hazard possibilita averiguar o risco de um equipamento sofrer um evento em determinado tempo t , dado que o evento não tenha acontecido. Para os autores, uma outra função é indexada à função de risco acumulado apresentada pela equação (23) (CARVALHO et al., 2011; CROWTHER; LAMBERT, 2017).

$$H(t) = \int_0^t h(u) d(u) \quad (23)$$

Colosimo e Giolo (2006) chamam atenção para o fato que a função de risco é mais informativa do que a função de sobrevivência. Diferentes funções de sobrevivência podem ter formas semelhantes, enquanto que as respectivas funções de taxa de falha podem diferir. Desse modo, a modelagem da função taxa de falha é um importante método para dados de sobrevivência. Os modelos de análise de dados podem ser estimados pelas técnicas não-paramétricas, modelos de sobrevivência probabilísticos, modelos de regressão paramétricos e o modelo de regressão de Cox.

Uma das recomendações importantes para melhor viabilizar os estudos de sobrevivência é buscar detalhar o máximo possível a informação relacionada ao tempo, incluindo sempre datas para cada mudança verificada em covariáveis. A estruturação cuidadosa do banco de dados, de forma a refletir a variação temporal, evita erros e desperdícios de recursos. Além disso, é sempre necessário avaliar comparativamente os custos, em geral maiores na coleta das informações do que na análise. A seleção do modelo estatístico mais adequado dependerá do tipo de esboço do estudo, de seus objetivos, das variáveis pesquisadas e da forma pela qual foram coletadas e classificadas as observações (CARVALHO et al., 2011).

2.8.1 Técnicas de Sobrevivência Não-Paramétricas

As investigações de Peto (1973) e Turnbull (1976) impulsionaram o desenvolvimento de novas técnicas estatísticas. Na abordagem não-paramétrica, a estimação é realizada sem que desenvolva-se suposições em relação da distribuição de probabilidade do tempo de sobrevivência, ou seja, não possui parâmetros estimados. Duas formas não-paramétricas de estimação das funções básicas de sobrevivência, assim como a variabilidade dessas estimativas serão apresentadas. São elas: estimador de Kaplan-Meier para função de sobrevivência $S(t)$, e o estimador de Nelson-Aalen para função de risco acumulado $\Lambda(t)$ (PAPOILA, 2011).

2.8.1.1 Estimador de Kaplan-Meier

O estimador de Kaplan-Meier também conhecido por método limite-produto é o mais utilizado da função de sobrevivência. O método de Kaplan-Meier fundamenta-se em fragmentar o tempo contínuo em intervalos, da qual os limites condizem ao tempo de continuidade dos eventos. Esse método avalia a sobrevivência sempre que um equipamento venha a falhar. As probabilidades de falha são calculadas somente no instante em que elas ocorrem (KAPLAN; MEIER, 1958).

Para exemplificar a aplicação do estimador, suponha-se que n equipamentos sejam observados levando em consideração a observação do tempo de falha para um dos equipamentos em que k tempos distintos $t_1 < t_2 < \dots < t_k$. Considerando-se d_j o número de falhas, w_j o número de censuras e n_j a quantidade de equipamentos sob risco de falhas no tempo t_j . Se uma falha e uma censura ocorrem simultaneamente, considera-se a falha antes da censura. O estimador é dado pela equação (24) (MACHADO, 2011).

$$\hat{S}_{km}(t) = \prod_{j:t_j \leq t} 1 - \left(\frac{R(t_j) - \Delta N(t_j)}{R(t_j)} \right) \quad (24)$$

Em que: $R(t_j)$ corresponde ao número de equipamentos no grupo de risco no tempo t_j e $\Delta N(t_j)$ é o número total de eventos ocorridos em t_j (MACHADO, 2011).

2.8.1.2 Estimador de Nelson-Aalen

O estimador de Nelson-Aalen foi desenvolvido a princípio por Nelson (1972) para função de risco acumulado $\tilde{\Lambda}(t)$ e depois aperfeiçoado por Aalen (1978) evidenciando sua utilização em processos de contagem por suas características assintóticas. Esse estimador é mais recente que o de Klapan-Meier (DA SILVA PEREIRA; PEREIRA, 2017). A equação (25) apresenta a forma do estimador.

$$\tilde{\Lambda}(t) = \sum_{j:t_j < t} \frac{d_j}{n_j} \quad (25)$$

Dado que d_j e n_j são estabelecidos como no estimador de Kaplan-Meier (DA SILVA PEREIRA; PEREIRA, 2017).

2.8.2 O Método de Máxima Verossimilhança

Dado uma amostra observada, determina-se a distribuição mais plausível dentro de uma variedade pelo método de máxima verossimilhança, selecionando a combinação mais adequada. Segundo (CARVALHO et al., 2011) a principal vantagem do método é a flexibilidade de utilizar dados censurados independentemente do tipo. A função de verossimilhança para um parâmetro genérico θ é expressa pela equação (26).

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i; \theta) \quad (26)$$

Em que L é função de θ que pode estar representando um único parâmetro ou conjunto de parâmetros (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

A função de verossimilhança para dados censurados à direita parte da suposição que os tempos de ocorrência do evento são independentes, não possuindo exatidão acerca do tempo de sobrevida. Sabe-se apenas que o tempo de sobrevida é maior que o tempo observado. A equação (27) apresenta a função modificada incluindo as informações apresentadas (CARRASCO; NAKANO, 2016).

$$L = \prod_{i \in 0} f(t_i) \prod_{i \in D} S(t_{i+}) \quad (27)$$

Sendo que D é o conjunto de equipamentos com tempos de sobrevida censurados à direita (CARVALHO et al., 2011; CARRASCO; NAKANO, 2016).

Para dados censurados à esquerda onde a data do evento é descohecida e o tempo de sobrevida analisado é inferior ao tempo de sobrevida real, a função de verossimilhança é expressa pela equação (28) (PAPOILA, 2011).

$$L = \prod_{i \in 0} f(t_i) \prod_{i \in E} (1 - S(t_{i-})) \quad (28)$$

Onde E é o conjunto de equipamentos com tempos de sobrevida censurados a esquerda (PAPOILA, 2011).

Em outro modelo, (CARVALHO et al., 2011) apresenta a função de verossimilhança para censuras intervalares, ou seja, o evento de interesse ocorreu dentro de um intervalo conhecido. A função para esse tipo de dados é expressa pela equação (29).

$$L = \prod_{i \in 0} f(t_i) \prod_{i \in I} (S(t_{i-}) - S(t_{i+})) \quad (29)$$

Sendo I o conjunto de equipamentos com tempos de sobrevida com cesura intervalar (CARVALHO et al., 2011).

2.8.3 Modelo de Regressão de Cox

O modelo de regressão de Cox é frequentemente utilizado na análise de sobrevida para avaliar o poder de explicação das covariáveis. Essa modelagem é a mais aplicada em estudos clínicos pela versatilidade proporcionada. A partir dessas questões que Cox propôs um modelo, denominado modelo de riscos proporcionais. O modelo de riscos proporcionais parte do princípio da proporcionalidade constante dos riscos ao longo de todo o tempo de observação (COX, 1972).

Nessa perspectiva Hanagal (2011) aponta que o modelo de Cox é flexível em eventos múltiplos, estratificação, fragilidade, riscos competitivos dentre outros. Ainda segundo o autor, um dos grandes diferenciais do modelo constitui-se no teste de hipóteses específicos e independe do tipo de distribuição do tempo de sobrevida. O modelo de riscos proporcionais é um modelo semiparamétrico que permite analisar dados oriundos de estudos em que a resposta medida é o tempo até a ocorrência de um evento de interesse, ajustado por covariáveis (x_1, \dots, x_p) . No caso geral o modelo assume a forma apresentada na equação (30).

$$h(t) = h_0(t) g(x'\beta) = h_0(t) \exp(\beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p) \quad (30)$$

Sendo g a função a ser especificada, $h_0(t)$ o componente não-paramétrico além de ser uma função não-negativa e não especificada frequentemente chamada de função de risco basal. É a probabilidade de um evento ocorrer quando não há covariáveis no modelo até o tempo (t) , dessa forma todos os β serão iguais a zero. Considera-se o componente paramétrico $g(x'\beta)$ uma combinação linear das covariáveis, são comuns em todos os indivíduos e não há o interesse de defini-la (HANAGAL, 2011).

Esse modelo assume que as covariáveis possuem uma implicação multiplicativa na função de risco, pois a razão das taxas de falhas (HR) entre i e j são distintos e constantes no tempo, conforme expressa nas equações (31) e (32) respectivamente.

$$HR_{(t,i,j)} = \frac{h_i(t)}{h_j(t)} = \frac{h_0(t) \exp(x'_i \beta)}{h_0(t) \exp(x'_j \beta)} = \exp(x'_i \beta - x'_j \beta) \quad (31)$$

$$HR_{(t,i,j)} = \exp(x'_i \beta - x'_j \beta) \quad (32)$$

Ao admitir no início do estudo que o indivíduo i tem um risco de falha igual a duas vezes o risco do indivíduo j , então a razão apresentada será a mesma para todo o período de tempo considerado, ou seja, não dependerá do tempo. A suposição básica para o uso do modelo de Cox é, portanto, que as taxas de falha sejam proporcionais (COX, 1975; COX; OAKES, 1984).

2.8.3.1 Ajuste do modelo de Cox

O modelo de regressão de Cox é caracterizado pelos coeficientes β que verificam a consequência das covariáveis sobre a função de taxa de falhas. Essas quantidades devem ser estimadas por intermédio das observações amostrais para que o modelo seja determinado. O método de máxima verossimilhança torna-se inadequado para estimação dos coeficientes β devido à presença de $h_0(t)$, ou seja, a componente não-paramétrica. Para solucionar essa adversidade condiciona-se a verossimilhança para excluir essa função de confusão, chamado de método de máxima verossimilhança parcial ou condicional (COX; HINKLEY, 1974).

A verossimilhança parcial é a probabilidade condicional da i -ésima observação vir a falhar no tempo t_i , conhecendo quais observações estarão sob risco em t_i , conforme a equação (33) (COX, 1972).

$$\frac{h_i(t_i)}{\sum_{j \in R(t_i)} h_j(t_i)} = \frac{h_0(t) \exp(x'_i \beta)}{\sum_{j \in R(t_i)} h_0(t) \exp(x'_j \beta)} = \frac{\exp(x'_i \beta)}{\sum_{j \in R(t_i)} \exp(x'_j \beta)} \quad (33)$$

Em que $R(t_i)$ corresponde ao conjunto dos índices das observações sob risco no tempo t_i . A função de verossimilhança a ser utilizada para realizar inferências no modelo, é então estabelecida pelo produto de todos os termos representados na equação (33), associando-se os distintos tempos de falhas de acordo com a equação (34) (COX, 1972; COX, 1975).

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^k \frac{\exp(x'_i \beta)}{\sum_{j \in R(t_i)} \exp(x'_j \beta)} = \left[\prod_{i=1}^n \frac{\exp(x'_i \beta)}{\sum_{j \in R(t_i)} \exp(x'_j \beta)} \right]^{\delta_i} \quad (34)$$

Onde δ_i representa o valor de falha. A função de verossimilhança parcial e os valores de β que maximizam $L(\beta)$ são adquiridos pela resolução do sistema de equações definido pelo vetor escore $U(\beta) = 0$ derivados da função $\ln(L(\beta))$, isso é representado pela equação (35).

$$U(\beta) = \sum_{i=1}^n \left[\delta_i x_i - \frac{\sum_{j \in R(t_i)} x_j \exp(x'_j \beta)}{\sum_{j \in R(t_i)} \exp(x'_j \beta)} \right] = 0 \quad (35)$$

A função de verossimilhança parcial assume que os tempos de sobrevivência são contínuos não pressupondo a possibilidade de empates nos valores observados. Sabe-se que na prática podem ocorrer empates nos tempos de falhas ou censuras, isso acontece devido a escala de medida. Quando ocorrem empates entre falhas e censuras utiliza-se a convenção de que a censura ocorreu após a falha, o que define as observações a serem incluídas no conjunto de risco em cada tempo de falha (MADEIRA; INFANTE; DIDELET, 2013; COLOSIMO; GIOLO, 2006). A equação (36) apresenta a seguinte aproximação para observações empatadas.

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^k \frac{\exp(s'_i \beta)}{[\sum_{j \in R(t_i)} \exp(s'_j \beta)]^{d_i}} \quad (36)$$

Sendo s_i o vetor formado pela soma das correspondentes p covariáveis para os indivíduos que falham no tempo $t_i = 1, \dots, k$ e d_i corresponde ao número de falhas nesse mesmo tempo. De acordo com Colosimo e Giolo (2006), essa aproximação é apropriada quando o número de observações empatadas em qualquer tempo não é grande.

2.8.3.2 Testes de significância dos coeficientes

A significância dos coeficientes β deve ser avaliada utilizando-se o teste de Wald e o teste da razão de verossimilhança também denominado de análise da função desvio. Teste de Wald é obtido pela comparação de estimativas de verossimilhança dos parâmetros β com a estimativa do seu erro padrão. A estatística de Wald testa a hipótese nula H_0 de que o parâmetro da regressão β é igual a zero, definida pela equação (37) (ANDRADE et al., 2017).

$$z = \frac{\hat{\beta}}{ep(\hat{\beta})} \quad (37)$$

Em que $ep(\hat{\beta})$ é o erro padrão do coeficiente $\hat{\beta}$. O teste da razão de verossimilhança compara modelos conjugados avaliando se a inserção de uma ou mais covariáveis no modelo aumenta de modo significativo a verossimilhança de um modelo em relação ao modelo mais

parcimonioso. A estatística do teste da razão de verossimilhança é dada pela equação (38) (HANAGAL, 2011).

$$\chi^2 = 2 [\ln L(0) - \ln L(\beta)] \quad (38)$$

Onde $\ln L(0)$ corresponde ao valor do logaritmo da verossimilhança do modelo básico e $\ln(\beta)$ o valor do logaritmo do modelo a ser testado sob a hipótese nula H_0 de que os coeficientes são iguais a zero, a estatística do teste segue uma distribuição qui-quadrado com grau de liberdade igual a um, para uma covariável contínua e $n - 1$ graus de liberdade para covariáveis categóricas, em que n é a quantidade de faixas que essa covariável é dividida (VIEIRA et al., 2016; CARVALHO et al., 2011).

2.8.3.3 Estimação de funções relacionadas com $h_0(t)$

Os coeficientes de regressão β são as quantidades de maior interesse na modelagem estatística de dados, por outro lado, funções relacionadas a $h_0(t)$ são também relevantes no modelo de Cox. Estas funções referem-se à função de taxa de falha acumulada e a função de sobrevivida apresentadas respectivamente pelas equações (39) e (40) respectivamente (COLOSIMO; GIOLO, 2006).

$$H_0(t) = \int_0^t h_0(u) du \quad (39)$$

$$S_0(t) = \exp(-H_0(t)) \quad (40)$$

Onde u corresponde a função de sobrevivida. Essas funções são importantes pela utilização das mesmas em técnicas gráficas para avaliar a adequação do modelo ajustado. A função de sobrevivida é expressa pela equação (41).

$$S(t) = [S_0(t)]^{\exp\{x'\beta\}} \quad (41)$$

A equação (41) é útil quando deseja-se concluir a análise em termos de percentis associados a grupos de indivíduos. Se $h_0(t)$ fosse estimada parametricamente poderia ser

estimada pelo método de verossimilhança, porém, na verossimilhança parcial o pressuposto condicional exclui essa função da verossimilhança, dessa forma, os estimadores, para essas quantidades, são de natureza não-paramétrica. A função escada com saltos nos tempos distintos de falhas é considerada uma estimativa simples, exposta pela equação (42) (BRESLOW, 1972; COLOSIMO; GIOLO, 2006).

$$\hat{H}_0(t_i) = \sum_{j:i \in R_j} \frac{\delta_i}{\sum_{1 \in r_j} \exp(x'_1 \hat{\beta})} \quad (42)$$

Dessa forma, as funções $S_0(t)$ e $S(t)$ podem ser estimadas a partir das equações (39) e (40) respectivamente (BRESLOW, 1972; COLOSIMO; GIOLO, 2006).

2.8.3.4 Qualidade geral de ajuste do modelo

Os resíduos gerados pelos modelos paramétricos são utilizados com a finalidade de avaliar a qualidade geral de ajuste do modelo de Cox, sendo aplicados também para os resíduos de Cox e Snell (1968). Para os autores, os resíduos de Cox e Snell são definidos pela equação (43).

$$\hat{e}_i(\Lambda_i) = \exp \sum_{k=1}^p x_{ip} \hat{\beta}_k \quad (43)$$

Onde $i = 1, \dots, n$. Dessa forma, se o modelo analisado estiver bem ajustado, os \hat{e}_i 's devem ser tratados como uma amostra censurada de distribuição exponencial, sendo assim, o gráfico deve aproximar-se de uma reta. A utilização de gráficos envolvendo esses resíduos não são recomendados para avaliação da suposição de risco proporcionais, pois os resíduos não fornecem informações sobre o tipo de problema que afetaria o ajuste (SILVA et al., 2017).

2.8.3.5 Teste de Log-rank para comparação de curvas de sobrevida

Existem vários testes que ponderam as observações de acordo com a importância que se deseja dar ao início ou final do tempo de sobrevida. Para a comparação entre duas ou mais curvas de sobrevida pode-se utilizar o teste de Log-rank ou o teste clássico de qui-quadrado. O teste de Log-rank é bastante disseminado em análise de sobrevida, favorável quando a razão

das funções de risco dos grupos contrapostos é aproximadamente constante. Se a distribuição avaliada for proporcional à distribuição esperada, a curva de sobrevida dos equipamentos pertencentes ao estrato é proporcional à curva de sobrevida dos equipamentos em geral. As hipóteses para o teste são: H_0 = as curvas não apresentam diferença significativa; H_1 = as curvas apresentam diferença significativa (LINS; FIGUEIREDO; ROCHA, 2017).

Para realizar o teste de Log-rank, calcula-se a estatística em duas etapas: (i) estima-se o número de eventos esperados para cada estrato k ; (ii) a hipótese nula de incidência igual em todos os estratos. Para calcular o estrato k utiliza-se a equação (44) (CARVALHO et al., 2011; XIONG; WU, 2017).

$$E_k(t) = \Delta N(t) \frac{R_k(t)}{R(t)} \quad (44)$$

Em que $\Delta N(t)$ é o número total de eventos observados, $R_k(t)$ é o número de pessoas em risco no estrato k e, $R(t)$ é o número total de equipamentos em risco no estudo, tudo no tempo t . Considerando no estrato 1 o total de eventos esperados E_1 bem como o total de eventos observados O_1 , a estatística log-rank é dada pela equação (45) (CARVALHO et al., 2011).

$$\text{Log-rank} = \frac{(O_1 - E_1)^2}{\text{Var}(O_1 - E_1)} \quad (45)$$

A estatística log-rank é calculada a partir da diferença entre o número total de eventos observados e o número total de eventos esperados, seguindo uma distribuição χ^2 com 1 grau de liberdade. O fator de padronização para o cálculo é a variância para $k = 2$, conforme a equação (46).

$$\text{Var}(O_1 - E_1) = \sum_t \frac{[R_k(t) - \Delta N(t)]}{R(t)^2 [R(t) - 1]} \quad (46)$$

Onde $R_k(t)$ corresponde ao número de indivíduos em risco no estrato k , eventos observados em t , $\Delta N(t)$ é o número de eventos observados em t , $R(t)$ é o número total de indivíduos em risco no tempo t (XIONG; WU, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo destina-se a apresentar o método empregado na pesquisa para se atingir o objetivo geral e os específicos. Primeiramente, são apresentados os aspectos que descrevem a natureza, a abordagem do problema, os objetivos e os procedimentos da pesquisa. Posteriormente, são descritos o local da pesquisa e a forma de coleta dos dados, bem como os procedimentos para a análise estatística.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Uma pesquisa pode ser classificada em categorias que se dividem quanto à natureza da pesquisa, à abordagem do problema, aos objetivos e aos procedimentos utilizados. No Quadro 5 é apresentada a classificação do presente estudo (PRODANOV; DE FREITAS, 2013).

Quadro 5 – Classificação da pesquisa

Categorias	Classificação
Natureza	Pesquisa Aplicada
Abordagem	Pesquisa Quantitativa
Objetivos	Pesquisa Exploratória
Procedimentos	Estudo de caso

Fonte: Elaborado a partir de Prodanov e De Freitas (2013)

A pesquisa aplicada tem como princípio constituir conhecimentos para aplicação prática voltados à solução de problemas específicos envolvendo verdades em partes. Para esta pesquisa pretende-se utilizar a pesquisa exploratória, conhecida também como pesquisa de base, pois oferece dados elementares que irão dar suporte para a realização de estudos mais aprofundados sobre o tema. O procedimento que se utilizará para a pesquisa é o estudo de caso, documental, orientado segundo um estudo bibliográfico que reside no fato de permitir ao pesquisador abrangência de um conjunto de fenômenos e dados amplamente dispersos pelo espaço (PRODANOV; DE FREITAS, 2013).

Em relação à análise de dados, a pesquisa decorrerá de forma quantitativa, que remete para uma explanação das causas por meio de medidas objetivas, verificando hipóteses,

utilizando-se basicamente dos métodos estatísticos e da maneira qualitativa que se preocupa com a compreensão e a interpretação do fenômeno (MASCARENHAS, 2012).

Desse modo, neste capítulo aborda-se a metodologia aplicada para a aquisição de conhecimento e de como fazer ciência proporcionando caminhos alternativos, ferramentas e procedimentos. É uma ciência instrumental que apoia as outras ciências, flexível aos caminhos e as possibilidades na resolução dos problemas para os quais procura-se resultados apropriados em relação aos propósitos pretendidos. É marcada pelo desenvolvimento de diversas maneiras de produzir o conhecimento científico e percorre sete etapas principais que são: descobrimento do problema, análise do problema, busca por teorias, métodos, técnicas ou dados que auxiliem no entendimento do problema, tentativa de resolução por meio de teorias existentes, comprovação da solução e correção da hipótese, técnicas ou teorias (NASCIMENTO, 2012).

3.2 LOCAL DO ESTUDO

O estudo foi realizado na área de descarga de vagões e embarque de minério do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM), situado no litoral do estado do Maranhão às margens da Baía de São Marcos na cidade de São Luís, com 600 mil metros quadrados de área, direcionado para exportação de minério de ferro e manganês. Além disso, o qual também movimentava concentrado de cobre, ferro gusa e soja. O *overview* do terminal é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – *Overview* das áreas de operação do TMPM



Fonte: Adaptado de Cutrim et al. (2017)

Atualmente, a capacidade de embarque do TMPM é de 150 milhões de toneladas/ano, entretanto, a previsão de embarque para 2020 é de 230 milhões de toneladas/ano. A logística

integrada (mina, ferrovia e porto) facilita o processo de escoamento dos produtos. O processo produtivo se resume na extração do minério, no transporte por meio da ferrovia EFC (Estrada de Ferro Carajás), na descarga dos vagões e no embarque. O terminal possui um sistema de gerenciamento das operações e de manutenção fundamentado nas melhores práticas internacionais (UNES et al., 2015).

Cutrim et al. (2017) enquadram as operações básicas do TMPM como recepção e descarga do minério de ferro, direcionamento para os pátios, recuperação e traslado para embarque nos navios. O traslado de minério pelo terminal é realizado por cinco conjuntos de equipamentos, são eles: os viradores de vagões, recuperadoras, empilhadeiras recuperadoras, correias transportadoras e os carregadores de navios, esse processo é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Operações básicas TMPM



Fonte: Elaborado a partir Vale Informar (2016)

As operações automatizadas de movimentação de minério de ferro, realizadas no terminal, são compostas por um sistema complexo envolvendo grande instalações e equipamentos de grande porte. No TMPM, o material é conduzido dos viradores de vagões (VV's) para os pátios de estocagem por correias transportadoras (CT), no qual, o minério é captado pelas recuperadoras e/ou empilhadeira recuperadora (RR-ER) e também por correias é transferido aos carregadores de navios (CN's) onde é depositado nos porões dos navios graneleiros (navios especializados no transporte de granel e mercadorias). A estocagem do material, por determinado período, é importante para corrigir ou melhorar algumas das características físicas e químicas do minério, assim como para atender as demandas da logística operacional (UNES et al., 2015).

Para realização deste estudo, foram considerados 95 correias transportadores, responsáveis pela movimentação de material ao longo do processo de descarga e empilhamento.

O terminal possui cerca de 100 km de correias transportadoras divididas em todas as operações. Esse é o meio mais eficiente para o transporte contínuo de material a granel, o qual basicamente consiste em uma esteira de borracha montada em uma estrutura de tambores e rolos de apoio com um sistema de acionamento automático, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Correia Transportadora (CT)



Fonte: Mult Jr. (2016)

Os transportadores são compostos de diversos componentes que garantem seu funcionamento de forma econômica e segura, além de possuir grande versatilidade e grande capacidade de carga. Devido as suas características mecânicas e elétricas, esses equipamentos apresentam dispositivos destinados à segurança pessoal das equipes de operação e à manutenção (ELETROBRÁS et al., 2009).

As informações do estudo são de uma gerência de operações do TMPM de uma multinacional que possui grande relevância, sobretudo, no setor de mineração e logística. A gerência de operações portuárias na qual o estudo foi desenvolvido é responsável pela operação de parte do sistema portuário de movimentação de granéis sólidos, assim como atividades de apoio direto à operação.

3.3 COLETA DE DADOS

Os dados que irão compor as análises foram obtidos diretamente na empresa em que os transportadores operam, sendo provenientes de um sistema interno de automação industrial contendo todas as informações de operação. Ao todo, foram coletados 2.922 dados, em horas

de operação dos transportadores de granéis sólidos. O momento de entrada dos equipamentos no grupo de estudo foi o período de coleta dos dados e, como tempo final, é considerado, a data de falha operacional do equipamento ou a data do término da pesquisa. O evento de interesse da pesquisa foram as falhas dos transportadores por paradas operacionais. A falha não causada por falha operacional foi considerada perda do monitoramento, sendo esse transportador censurado. A variável dependente é o tempo até a falha dos equipamentos. As covariáveis de interesse para comparação das curvas de sobrevida (Quadro 6) são: (i) o turno de trabalho; (ii) o equipamento de origem; (iii) os tipos de minério; (iv) os tipos de falha; (v) a área de operação; (vi) a quantidade de vagões descarregados; (vii) e toneladas movimentadas.

Quadro 6 – Definição constitutiva e operacional das covariáveis

Covariável	Definição constitutiva	Definição operacional
Turno de trabalho	Refere-se aos horários distintos ou horários constantes de trabalho.	Essa variável foi mensurada com base em três categorias: (1) Turno 1 (7h as 15h); (2) Turno 2 (15h as 23h); (3) Turno 3 (23h as 07h).
Equipamento de origem	Refere-se ao equipamento de origem a correia transportadora estava movimentando material no momento do evento.	Essa variável foi mensurada com base em quatro categorias: (1) VVa*; (2) VVb**; (3) RR; (4) ER. *Sistema que envolve os viradores de vagões 1,2,3 e 4. **Sistema que envolve os viradores de vagões 5,6,7 e 8.
Tipos de minério	Refere-se ao tipo de material que estava sendo movimento quando ocorreu o evento.	Essa variável foi mensurada com base em três categorias: (1) Sinter; (2) Granulado; (3) Pellet Feed; (4) Manganês.
Tipos de falhas	Refere-se ao tipo de falha que ocasionou o evento de interesse.	Essa variável foi mensurada com base em quatro categorias: (1) Sonda; (2) Detectora de rasgo; (3) Chave de emergência; (4) Sobrecarga.
Área de operação	Refere-se à área de operação da correia transportadora no sistema produtivo.	Essa variável foi mensurada com base em duas categorias: (1) Descarga; (2) Embarque.
Quantidade de Vagões	Refere-se ao número de vagões descarregados no momento do evento.	Essa variável é mensurada como quantitativa discreta.
Toneladas	Refere-se a quantidade de minério movimentado no momento do evento.	Essa variável é classificada como quantitativa contínua.

Fonte: Elaborado pelo autor

O desenvolvimento de atividades em turnos são maneiras de arranjo da jornada de trabalho, em que são realizadas em horários distintos ou em horários constantes, comumente

utilizadas por indústrias de produção contínua buscando uma maior quantidade de produto em intervalos de tempos cada vez menores. Em relação aos equipamentos, os viradores de vagões são equipamentos responsáveis pelo descarregamento dos materiais granel transportados pelos trens da mina de extração até o início do processo de embarque. O material é descarregado por meio de um dispositivo de rotação do virador e transladado por meio de correias transportadoras até os pátios de estocagem.

As empilhadeiras recuperadoras e recuperadoras são equipamentos com a função de empilhar ou recuperar os minérios estocados no pátio e enviá-los para o embarque nos navios. Os tipos de minérios são classificados de acordo com caracterização mineralógica e granulométrica de cada elemento. O *Sinter* é um minério fino com a granulometria entre 0,15 mm a 6,3 mm. O Granulado é o minério de maior granulometria, entre 6,3 mm a 32 mm. O *Pellet Feed* é o mais fino dos tipos de minérios apresentados com granulometria menor de 0,15 mm. Já o Manganês pode ter a granulometria entre 0,15 mm a 9 mm.

Devido as suas características mecânicas e elétricas, os transportadores de correia apresentam um elevado grau de risco para a segurança pessoal da equipe de colaboradores envolvida na operação e manutenção deste equipamento. Dessa forma, os dispositivos de proteção (sonda, chave de emergência, detectora de rasgo e sobrecarga) são utilizados nos transportadores de correia para reduzir o risco de ocorrências de acidentes pessoais e materiais, assim como custos não planejados.

Classifica-se como sonda os dispositivos que permitem a interrupção do fluxo de material no caso de acúmulo excessivo de material no interior do chute de transferência (entupimento) da correia transportadora posterior. As chaves de emergência são dispositivos destinado a parar o transportador quando esse esteja operando em condição de risco ou emergência. As principais causas para atuação da chave de emergência são: atuação por problemas de manutenção ou atuação por problemas de operação.

A detectora de rasgo é um dispositivo eletromecânico instalado sob a face de carga, próximo ao ponto de alimentação, cuja finalidade é detectar o início do surgimento de rasgo na correia, com isso evitando o aumento do rasgo. Devido ao seu princípio de funcionamento, esse dispositivo não detecta ocorrências em que as sessões cortadas trespassem entre si, o que impede a queda de material na bandeja, não acionamento do mecanismo. A sobrecarga ocorre devido um fluxo irregular de material sobre as correias transportadoras, provocando a interrupção do funcionamento do equipamento.

Os vagões são classificados como veículos de cargas utilizados para o transporte de minério da mina de extração ao lago da malha ferroviária. Consiste em toneladas uma unidade de massa equivalente a 10^3 kg, amplamente utilizada quando trabalha-se com grandes pesos.

3.4 MÉTRICAS DE ANÁLISE DOS DADOS

Inicialmente foi realizada uma análise estatística descritiva de todas as variáveis estudadas. Foi utilizado o método de Kaplan-Meier para estimar a probabilidade de sobrevida global dos transportadores considerando a quantidade de horas que os equipamentos ficaram sem falhar, a condição final do equipamento (falha ou censura), e comparação das curvas de sobrevida utilizando o teste de Log-rank.

No estudo foi verificado o efeito de cada covariável na sobrevida dos transportadores, analisando a significância de cada uma delas para o modelo proposto, possibilitando a discussão de fatores de riscos envolvidos no processo de falha desses equipamentos, por meio do modelo de Regressão de Cox. Na análise multivariável calculou-se a razão de risco (bruta e ajustada) ou *hazard ratio* (HR). A qualidade do ajuste do modelo foi avaliada pela estimativa de probabilidade de concordância, aplicada para avaliar o poder discriminatório e a acurácia do modelo. Posteriormente foi realizada a análise dos resíduos de Schoenfeld para avaliar a proporcionalidade temporal dos riscos, verificando uma possível correlação linear no tempo. Verificou-se os resíduos de martingale e *deviance* para verificação de *outliers* e os resíduos *escore* para pontos influentes.

As análises foram realizadas por intermédio dos recursos computacionais *Statistica* 9.1 para *Windows* (*Statsoft Inc.*; <http://www.statsoft.com>), PASW 18 e RStudio versão 1.0.143. Todos os testes foram realizados considerando-se um nível de 5% de significância.

4 ARTIGO – AVALIAÇÃO DO TEMPO DE SOBREVIDA DE TRANSPORTADORES DE GRANÉIS SÓLIDOS EM UM TERMINAL MARÍTIMO PORTUÁRIO

RESUMO

O objetivo dessa pesquisa foi estimar a sobrevida de um grupo de equipamentos industriais portuários denominados transportadores de granéis sólidos, contribuindo assim para tomada de decisão do processo de manutenção. Este estudo foi realizado na área de descarga de vagões e embarque de minério do Terminal Marítimo Portuário localizado no litoral do estado do Maranhão, Brasil. O desfecho foi o tempo, em horas, até a falha dos equipamentos. As covariáveis de interesse para comparação das curvas de sobrevida foram: (i) o turno de trabalho, dividindo-se em (turno 1, turno 2 e turno 3); (ii) o equipamentos de origem classificados em (viradores de vagões, empilhadeira recuperadora ou recuperadora); (iii) os tipos de minério, divididos em (*Sinter*, Granulado, *Pellet Feed* ou Manganês); (iv) os tipos de falhas consideradas para o estudo serão (sonda, chave de emergência, detectora de rasgo e sobrecarga) (v) e a área de operação, classificadas como (descarga e embarque de minério). Utilizou-se o método de Kaplan-Meier para estimar a probabilidade de sobrevida global e comparou-se as curvas utilizando o teste de Log-rank. O efeito de cada covariável no tempo de sobrevida dos transportadores foi analisado por meio do modelo de regressão de Cox e para o qual, foi realizada a análise de resíduos e observações influentes. A probabilidade de sobrevida de 75% do sistema de movimentação de material granel equivale a um tempo de disponibilidade operacional de 444 horas. Observou-se que, dos 95 transportadores avaliados, 38 (40%) falharam e 57 (60%) foram censurados até o final do estudo. Os resultados mostram uma diminuição significativa da probabilidade de sobrevida dos equipamentos no decorrer do tempo de operação, além da diferença significativa entre as curvas de sobrevida das covariáveis turno, tipos de minérios, quantidade de vagões e toneladas movimentadas, indicado que as mesmas, são importantes preditoras no modelo de regressão de Cox. A pesquisa apresenta uma contribuição original para a literatura, por ser o primeiro estudo a investigar os fatores de risco associados a falhas de equipamentos utilizados na movimentação de minérios em uma planta industrial marítima portuária por meio da análise de sobrevida.

Palavras-chave: Manutenção Industrial. Estimador de Kaplan-Meier. Regressão de Cox.

EVALUATION OF THE SURVEY TIME OF SOLID GRANITE TRANSPORTERS IN A PORT MARITIME TERMINAL

ABSTRACT

The objective of this research was to estimate the survival of a group of industrial port equipment called solid bulk conveyors, thus contributing to decision making of the maintenance process. This study was carried out in the area of unloading of wagons and shipment of ore from the Port Maritime Terminal located on the coast of the state of Maranhão, Brazil. The outcome was the time, in hours, until the equipment failure. The covariates of interest for comparison of the survival curves were: (i) the work shift, divided into (shift 1, shift 2 and shift 3); (ii) equipment of origin classified as (wagon turners, recovery or recovery forklift); (iii) types of ore divided into (Sinter, Granulate, Pellet Feed or Manganese); (iv) the types of failures considered for the study will be (probe, emergency key, tear and overload detector) (v) and the operating area, classified as (discharge and shipment of ore). The Kaplan-Meier method was used to estimate the overall survival probability and the curves were compared using the log-rank test. The effect of each covariant on the survival time of the transporters was analyzed using the Cox regression model and for which the residue analysis and influential observations were performed. The 75% survival probability of the bulk material handling system is equivalent to an operational availability time of 444 hours. It was observed that of the 95 carriers evaluated, 38 (40%) failed and 57 (60%) were censored until the end of the study. The results show a significant decrease in the probability of survival of the equipment during the operating time, besides the significant difference between the survival curves of the covariables shift, types of ores, number of wagons and tons moved, indicated that they are important predictors in the Cox regression model. The research presents an original contribution to the literature, since it is the first study to investigate the risk factors associated to equipment failure used in ore movement in a marine port industrial plant through the analysis of survival.

Keywords: Industrial Maintenance. Kaplan-Meier Estimator. Regression of Cox.

1. INTRODUÇÃO

Em sistemas industriais complexos, a deterioração dos equipamentos e a produção de produtos defeituosos são pontos importantes que aumentam os custos inerentes da função produção. A implantação de políticas de manutenção associada ao monitoramento estatístico dos processos pode contribuir de forma significativa para a melhoria dos produtos e para confiabilidade dos equipamentos. Por isso, nos últimos anos, os modelos estatísticos e as políticas de manutenção têm atraído pesquisadores a desenvolverem estudos nessas temáticas (ALSYOUF, 2007; KHALIL; SAAD; GINDY, 2009; MADEIRA; INFANTE; DIDELET, 2013; YANG et al., 2018).

Na gestão da produção, todas as atividades podem contribuir significativamente para o bom desempenho de qualquer organização, seja de bens ou serviços, uma vez que utilizando os recursos disponíveis de forma eficaz implicará na satisfação dos seus consumidores. Um processo eficaz poderá trazer determinados benefícios, tais como: (i) minimizar os custos de manutenção; (ii) reduzir os investimentos para produção e (iii) maximizar a capacidade efetiva com maior confiabilidade dos equipamentos. Entre as funções operacionais e gerenciais, a manutenção é uma das mais relevantes, pois assume um papel estratégico na estrutura das organizações refletindo na operação, na logística e na percepção da qualidade (MENGUE; SELLITTO, 2013; FACCHINI; SELLITTO, 2014; ERICSON, 2015; SLACK; BRANDON-JONES; JHONSTON, 2015; CORRÊA; CORRÊA, 2017; BIANCHINI; ROSSI; ANTIPODI, 2018; BEMMENT et al., 2018).

A importância de prever falhas em equipamentos industriais, com maior confiabilidade e rapidez, faz com que novos métodos sejam explorados para trazer soluções e acelerar as estratégias de manutenção das organizações. Desse modo, esta pesquisa tem como propósito aplicar os métodos incorporados na análise de sobrevivência para estimar o tempo de vida em transportadores de grãos sólidos, caracterizados pelos tempos de falhas, e, geralmente, pela presença de censuras, além da definição dos elementos centrais dos tempos de falhas, sendo esses, o tempo inicial e o evento de interesse para o caso específico.

Medidas de prevenção de falhas são necessárias e devem ser tomadas para o bom funcionamento dos equipamentos industriais alinhadas com as estratégias organizacionais e com as políticas de manutenção (SILVA; CONCEIÇÃO; FRANÇA, 2014). Ainda, para os autores, toda empresa independente do segmento precisa de um sistema de gerenciamento da manutenção. Nesse cenário, o problema de pesquisa a ser investigado pode ser resumido no

seguinte questionamento: qual o tempo e quais fatores associados à probabilidade de sobrevida de equipamentos industriais de um Terminal Marítimo Portuário localizado no litoral do estado do Maranhão, Brasil?

Após a realização de uma revisão de literatura, constatou-se a escassez de trabalhos de Análise de Sobrevida aplicada em equipamentos industriais quando consultados nas bases de periódicos da *Scopus*, *Web of Science*, *Scielo*, *Emerald Insight*, *SciFinder* e *Academic Search Premier*. Observou-se diversas pesquisas na área da saúde, mas poucas na área de Engenharia de Produção. Madeira, Infante e Didelet (2013) realizaram um estudo em turbinas de expansão, utilizadas como fonte de refrigeração dos processos industriais na refinaria de Sines em Lisboa, com o objetivo de aplicar um modelo de Cox em equipamentos específicos, buscando variáveis do processo que causavam vibrações, bem como aplicar distribuições conhecidas à taxa de risco de linha de base. Khalaf et al. (2013) investigaram a disponibilidade de equipamentos médicos com base nos vários tipos de manutenção, apresentando modelo matemático de manutenção sobre a probabilidade de sobrevivência dos equipamentos. Goyal, Whelan e Cavalline (2016) realizaram um estudo no qual desenvolveram uma metodologia baseada na regressão de risco proporcional para identificar os fatores críticos que afetam a deterioração de pontes.

Esse artigo contribui para definição de estratégias e para tomada de decisão na gestão da manutenção de equipamentos de movimentação de granéis sólidos. Além disso, destaca *insights* para novos estudos, uma vez que se constatou na literatura acadêmica um gap de aplicações práticas a dados reais da análise de sobrevida no contexto industrial. Diante do exposto, este trabalho justifica-se pela relevância do tema, por tratar de uma contribuição original para literatura e pela flexibilidade de utilização da metodologia aplicada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo é baseado em dados de períodos passados (retrospectivo), ao longo do tempo (longitudinal), realizado na área de descarga de vagões e embarque de minério do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM), situado no litoral do estado do Maranhão às margens da Baía de São Marcos na cidade de São Luís, com 600 mil metros quadrados de área, direcionado para exportação de minério de ferro e manganês, o qual também movimenta concentrado de cobre, ferro gusa e soja. A escolha do local da pesquisa, foi motivada devido à importância do TMPM no cenário econômico mundial, por ser uma das principais instalações de movimentação de cargas do Brasil, destacando-se por possuir o maior volume movimentado,

com 106.425.524 toneladas em 2017, além de ser o maior exportador de minério de ferro do planeta.

Atualmente, a capacidade de embarque do TMPM é de 150 milhões de toneladas/ano, entretanto, a previsão de embarque para 2020 é de 230 milhões de toneladas/ano. A logística integrada (mina, ferrovia e porto) facilita o processo de escoamento dos produtos. O processo produtivo se resume na extração do minério, no transporte por meio da ferrovia EFC (Estrada de Ferro Carajás), na descarga dos vagões e no embarque. O terminal possui um sistema de gerenciamento das operações e de manutenção fundamentado nas melhores práticas internacionais (UNES et al., 2015).

Cutrim et al. (2017) enquadram as operações básicas do TMPM como recepção e descarga do minério de ferro, direcionamento para os pátios, recuperação e traslado para embarque nos navios. O traslado de minério pelo terminal é realizado por cinco conjuntos de equipamentos, são eles: os viradores de vagões, recuperadoras, empilhadeiras recuperadoras, correias transportadoras e os carregadores de navios, representados na Figura 1.

Figura 1 – Operações básicas realizadas no Terminal Marítimo Portuário



Fonte: Elaborado a partir de Vale Informar (2016)

As operações automatizadas de movimentação de minério de ferro, realizadas no terminal, são compostas por um sistema complexo envolvendo grande instalações e equipamentos de grande porte. No TMPM, o material é conduzido dos viradores de vagões (VV's) para os pátios de estocagem por correias transportadoras (CT), no qual, o minério é captado pelas recuperadoras e/ou empilhadeira recuperadora (RR-ER) e também por correias, transferido aos carregadores de navios (CN's) onde é depositado nos porões dos navios graneleiros (navios especializados no transporte de granel e mercadorias). A estocagem do material, por determinado período, é importante para corrigir ou melhorar algumas das

características físicas e químicas do minério, assim como para atender as demandas da logística operacional (UNES et al., 2015).

Para realização deste estudo, foram considerados 95 correias transportadoras, responsáveis pela movimentação de material ao longo do processo de descarga e empilhamento. O terminal possui cerca de 100 km de correias transportadoras divididas em todas as operações. Esse é o meio mais eficiente para o transporte contínuo de material a granel, o qual basicamente consiste em uma esteira de borracha montada em uma estrutura de tambores e rolos de apoio com um sistema de acionamento automático, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Correias transportadoras (CT)



Fonte: Mult Jr. (2016)

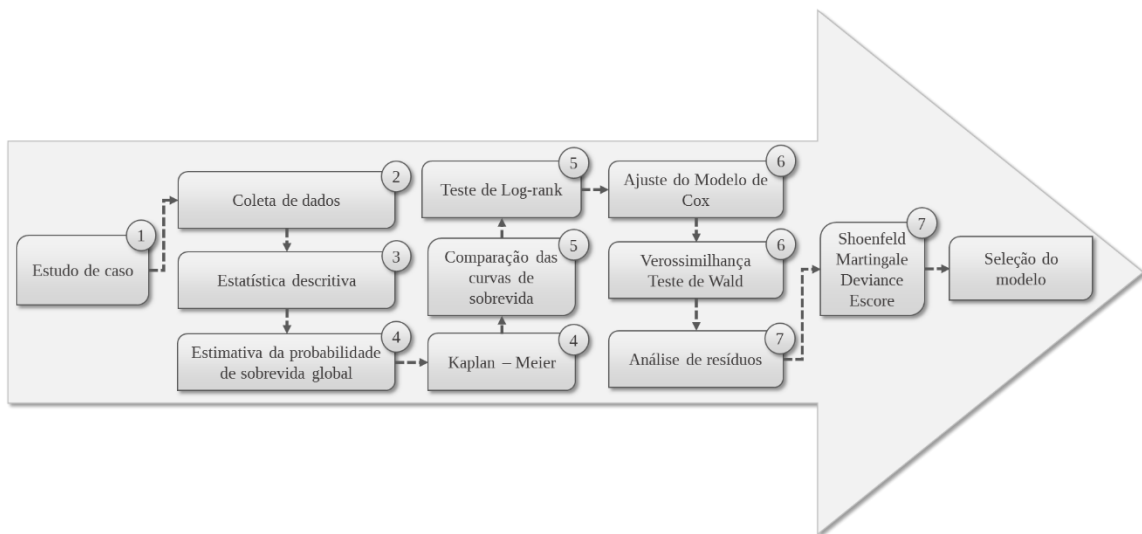
Os transportadores são compostos de diversos componentes que garantem seu funcionamento de forma econômica e segura, além de possuir grande versatilidade e grande capacidade de carga. Devido às suas características mecânicas e elétricas, esses equipamentos apresentam dispositivos destinados à segurança pessoal das equipes de operação e à manutenção (ELETROBRÁS et al., 2009).

As informações do estudo são de uma gerência de operações do TMPM de uma multinacional que possui grande relevância, sobretudo, no setor de mineração e logística, a qual é responsável pela operação de parte do sistema portuário de movimentação de graneis sólidos, assim como atividades de apoio direto à operação.

O momento de entrada dos equipamentos no grupo de estudo foi a data de coleta dos dados e, como tempo final, foi considerado a data de falha operacional do equipamento ou a data do término da pesquisa, em que o evento de interesse foi a falha dos transportadores por paradas operacionais, sendo censurados (perda de seguimento), aqueles cuja causa da falha não

tenha sido operacional. A variável dependente é o tempo até a falha dos equipamentos. As covariáveis de interesse para comparação das curvas de sobrevivência foram: (i) o turno de trabalho; (ii) o equipamento de origem; (iii) os tipos de minério; (iv) os tipos de falha; (v) a área de operação; (vi) a quantidade de vagões descarregados; (vii) e toneladas movimentadas. Os procedimentos e métodos utilizados foram sumarizados na Figura 3.

Figura 3 – Métodos de análise e seleção dos modelos para as covariáveis turno, tipos de minério, quantidade de vagões e toneladas movimentadas



Os dados que compõem as análises foram obtidos diretamente na empresa em que os transportadores operam, sendo provenientes de um sistema interno de automação industrial contendo todas as informações de operação. Ao todo, foram coletados 2.922 registros de tempos (em horas) de operação dos transportadores de granéis sólidos.

Inicialmente foi realizado uma análise estatística descritiva, na qual as variáveis foram sumarizadas pelo número total (n), proporções (%), média/mediana, erro-padrão, mínimo e máximo. Foi utilizado o método de Kaplan-Meier equação (1) para estimar a probabilidade de sobrevivência global dos transportadores considerando a quantidade de horas que os equipamentos ficaram sem falhar e a condição final do equipamento (falha ou censura).

$$\hat{S}_{km}(t) = \prod_{j:t_i \leq t} 1 - \left(\frac{R(t_j) - \Delta N(t_j)}{R(t_j)} \right) \quad (1)$$

Em que: $R(t_j)$ corresponde ao número de equipamentos no grupo de risco no tempo t_j e $\Delta N(t_j)$ é o número total de eventos ocorridos em t_j (MACHADO, 2011).

Para comparação das curvas de sobrevivência, aplicou-se o teste de Log-rank, considerando no estrato 1 o total de eventos esperados E_1 , bem como o total de eventos observados O_1 , sendo a estatística Log-rank dada pela equação (2) (CARVALHO et al., 2011).

$$\text{Logrank} = \frac{(O_1 - E_1)^2}{\text{Var}(O_1 - E_1)} \quad (2)$$

A estatística Log-rank é calculada a partir da diferença entre o número total de eventos observados e o número total de eventos esperados, seguindo uma distribuição χ^2 com 1 grau de liberdade. O fator de padronização para o cálculo é a variância para $k = 2$, conforme a equação (3).

$$\text{Var}(O_1 - E_1) = \sum_t \frac{[R_k(t) - \Delta N(t)]}{R(t)^2 [R(t) - 1]} \quad (3)$$

Onde $R_k(t)$ corresponde ao número de indivíduos em risco no estrato k , eventos observados em t , $\Delta N(t)$ é o número de eventos observados em t , $R(t)$ é o número total de indivíduos em risco no tempo t (XIONG; WU, 2017).

Para testar a significância dos coeficientes β , utilizou-se o teste de Wald, conforme apresentado na equação (4).

$$\chi^2 = 2 [\ln L(0) - \ln L(\beta)] \quad (4)$$

Onde $\ln L(0)$ corresponde ao valor do logaritmo da verossimilhança do modelo básico e $\ln(\beta)$ o valor do logaritmo do modelo a ser testado sob a hipótese nula H_0 de que os coeficientes são iguais a zero. A estatística do teste segue uma distribuição qui-quadrado com grau de liberdade igual a um, para uma covariável contínua e $n - 1$ graus de liberdade para covariáveis categóricas, em que n é a quantidade de faixas em que essa covariável é dividida (VIEIRA et al., 2016; CARVALHO et al., 2011).

Para avaliar a consistência dos parâmetros, utilizou-se a função de verossimilhança, conforme apresentados nas equações (5) e (6) respectivamente.

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^k \frac{\exp(x'_i \beta)}{\sum_{j \in R(t_i)} \exp(x'_j \beta)} = \left[\prod_{i=1}^n \frac{\exp(x'_i \beta)}{\sum_{j \in R(t_i)} \exp(x'_j \beta)} \right]^{\delta_i} \quad (5)$$

Em que $R(t_i)$ corresponde ao conjunto dos índices das observações sob risco no tempo t_i . A função de verossimilhança a ser utilizada, para realizar inferências no modelo, é então estabelecida pelo produto de todos os termos representados na equação (5), associando-se os distintos tempos de falhas de acordo com a equação (6) (COX, 1972; COX, 1975).

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^k \frac{\exp(x'_i \beta)}{\sum_{j \in R(t_i)} \exp(x'_j \beta)} = \left[\prod_{i=1}^n \frac{\exp(x'_i \beta)}{\sum_{j \in R(t_i)} \exp(x'_j \beta)} \right]^{\delta_i} \quad (6)$$

Onde δ_i representa o valor de falha. A função de verossimilhança parcial e os valores de β que maximizam $L(\beta)$ são adquiridos pela resolução do sistema de equações definido pelo vetor escore $U(\beta) = 0$ derivados da função $\ln(L(\beta))$, isso é representado pela equação (7).

$$U(\beta) = \sum_{i=1}^n \left[\delta_i x_i - \frac{\sum_{j \in R(t_i)} x_j \exp(x'_j \beta)}{\sum_{j \in R(t_i)} \exp(x'_j \beta)} \right] = 0 \quad (7)$$

No estudo foi verificado o efeito de cada covariável no tempo sobrevida dos transportadores, analisando a significância de cada uma delas para o modelo proposto, possibilitando a discussão de fatores de riscos envolvidos no processo de falha desses equipamentos, por meio do modelo de Regressão de Cox, representado pela equação (8).

$$h(t) = h_0(t) g(x' \beta) = h_0(t) \exp(\beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p) \quad (8)$$

Sendo g a função a ser especificada, $h_0(t)$ o componente não-paramétrico, além de ser uma função não-negativa e não especificada, frequentemente, chamada de função de risco basal. É a probabilidade de um evento ocorrer quando não há covariáveis no modelo até o tempo (t) , dessa forma todos os β serão iguais a zero. Considera-se o componente paramétrico $g(x' \beta)$ uma combinação linear das covariáveis, são comuns em todos os indivíduos e não há o interesse de defini-la (HANAGAL, 2011).

Para seleção das covariáveis do modelo de regressão de Cox, inicialmente foi realizado o estudo do efeito individual de cada uma, considerando os critérios de recomendados por Kleinbaum (1998), Rao (2000), Kleinbaum e Klein (2005) e Collet (2015), que selecionaram como candidata a ingressar no modelo multivariável aquelas covariáveis com (p-valor < 0,20), entretanto, para seleção do modelo final, permanecem apenas as que apresentarem (p-valor < 0,05).

Assim, calculou-se a razão de risco (bruta e ajustada) ou *hazard ratio* (HR), nas análises univariadas e multivariáveis, respectivamente. Foi avaliada a qualidade do ajuste do modelo pela estimativa da probabilidade de concordância utilizada para avaliar o poder discriminatório e acurácia do modelo. Para Carvalho et al. (2011), em modelos de sobrevida, dificilmente encontra-se valores com poder explicativo maior que 35%, isso se deve a grande variabilidade individual dos dados e questões complexas de mensuração. Ainda, segundo os autores, como regra geral, considera-se que: resultados entre 0,3 e 0,4, tem-se um modelo de baixo poder explicativo; considera-se a concordância por acaso se o valor for de 0,5; se estiver entre 0,6 e 0,7, tem-se um resultado comum; se estiver entre 0,7 e 0,8, tem-se um resultado discriminatório muito bom e se estiver entre 0,8 e 0,9, tem-se um resultado excelente.

Posteriormente foi realizada a análise de resíduos Schoenfeld para avaliar a proporcionalidade dos riscos, além disso, foi verificado se os resíduos possuem uma correlação linear com o tempo por meio dos resíduos de martingale e *deviance* para pontos aberrantes, e os resíduos *score* para pontos influentes. Os estudos de Andersen (1982), Chambers e Hastie (1992), Grambsch e Therneau (1994), Therneau e Grambsch (2000), Robert (2002) e Bemment et al. (2018) apresentam mais detalhes acerca dos métodos empregados.

As análises foram realizadas por intermédio dos recursos computacionais *Statistica* 9.1 para *Windows* (*Statsoft Inc.*; <http://www.statsoft.com>), PASW 18 e RStudio versão 1.0.143. Todos os testes serão realizados considerando-se um nível de 5% de significância.

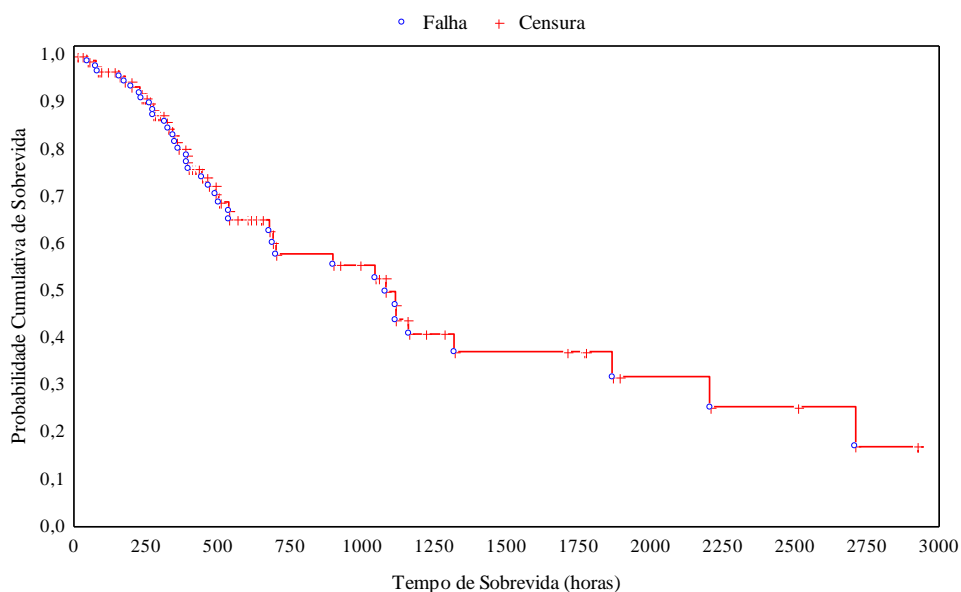
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período de estudo, observou-se que, entre os 95 transportadores de grânéis sólidos, o tempo mínimo de sobrevida de 10 horas e o máximo de 2.922 horas. O tempo médio de sobrevida global (\pm erro padrão) foi igual a 1.367 ± 153 horas. Dos transportadores estudados, 38 (40%) falharam até o final do estudo, sendo que 57 (60%) foram censurados. Esses transportadores foram censurados porque não falharam até o término do estudo ou

apresentaram outros tipos de falhas fora do objeto da pesquisa, como mecânica, elétrica, vulcanização e qualidade.

A função de sobrevivência acumulada foi estimada pelo método de Kaplan-Meier e a curva de sobrevida dos 95 transportadores pode ser observada pela Figura 4. É importante ressaltar que, por intermédio do estimador de Kaplan-Meier, a atualização da função de sobrevida é realizada apenas nos tempos onde ocorrem as falhas, sendo que para os equipamentos censurados este cálculo não é realizado.

Figura 4 – Curva de probabilidade de sobrevida global dos transportadores



Verifica-se que, para os 95 transportadores analisados, a probabilidade de sobrevida global decaiu para 65,15% a partir do tempo de 539 horas, permanecendo constante até 654 horas pois, nesse período, não ocorreu nenhuma falha no sistema de transporte de granéis sólidos, assim como decaiu para 37,18% em 1.318 horas, seguindo constante até 1.776 horas, mostrando que também nesse período, não houve nenhuma falha no sistema. Apenas 2 transportadores não falharam até o final do estudo (2.922 horas), correspondendo a probabilidade de sobrevida global de 17%. Após 444 horas, 25% dos transportadores apresentaram algum tipo de falha, no tempo 1.082 horas, 50% dos transportadores falharam e em 2.711 horas, 75% dos transportadores tiveram alguma falha.

Na Tabela 1 é apresentado a distribuição dos transportadores de acordo com as variáveis investigadas no estudo: turno de trabalho (turno 1, turno 2 e turno 3), equipamento de origem (viradores de vagões (a) e (b), empilhadeira recuperadora ou recuperadora), tipos de minério (*Sinter*, *Granulado*, *Pellet Feed* ou *Manganês*), tipos de falha (sonda, chave de emergência,

detectora de rasgo e sobrecarga) e área de operação (descarga e embarque de minério). As covariáveis toneladas e quantidades de vagões foram consideradas na forma contínua e discreta, respectivamente, para construção do modelo de Cox. Além disso, apresenta-se o resultado da comparação entre as curvas de sobrevida (p-valor).

Tabela 1 – Distribuição dos transportadores de acordo com o número de falhas, censuras e o resultado do teste de Log-rank para comparação das curvas de sobrevida

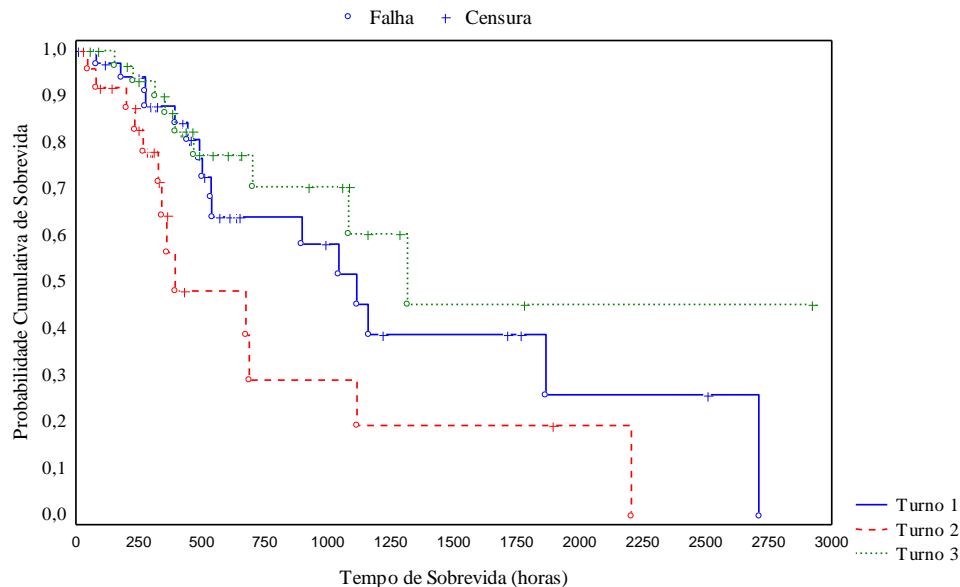
Variável	Falhas	Censuras	Transportadores	Log-rank
	n (%)	n (%)	n (%)	(p-valor)
Turno de Trabalho				
Turno 1 (07 - 15 horas)	16 (42%)	20 (35%)	36 (38%)	< 0,001
Turno 2 (15 - 23 horas)	13 (34%)	13 (23%)	26 (27%)	
Turno 3 (23 - 07 horas)	9 (24%)	24 (42%)	33 (35%)	
Total	38 (100%)	57 (100%)	95 (100%)	
Equipamento de Origem				
Virador de Vagões (a)	14 (37%)	14 (25%)	28 (29%)	> 0,05
Virador de Vagões (b)	3 (8%)	5 (9%)	8 (8%)	
Empilhadeira Recuperadora (ER)	15 (39%)	30 (53%)	45 (47%)	
Recuperadora (RP)	6 (16%)	8 (14%)	14 (15%)	
Total	38 (100%)	57 (100%)	95 (100%)	
Tipos de Minério				
Sinter	14 (37%)	20 (35%)	34 (36%)	< 0,001
Granulado	6 (16%)	9 (16%)	15 (16%)	
Pellet Feed	10 (26%)	11 (19%)	21 (22%)	
Manganês	7 (18%)	14 (25%)	21 (22%)	
Sem Classificação	1 (3%)	3 (5%)	4 (4%)	
Total	38 (100%)	57 (100%)	95 (100%)	
Tipos de Falha				
Sonda	9 (24%)	0 (0%)	9 (9%)	< 0,05
Detectora de Rasgo	9 (24%)	0 (0%)	9 (9%)	
Chave de Emergência	18 (47%)	0 (0%)	18 (19%)	
Sobrecarga	2 (5%)	0 (0%)	2 (2%)	
Sem Classificação	0 (0%)	57 (100%)	57 (60%)	
Total	38 (100%)	57 (100%)	95 (100%)	
Área de Operação				
Descarga	18 (47%)	19 (33%)	37 (39%)	> 0,05
Embarque	20 (53%)	38 (67%)	58 (61%)	
Total	38 (100%)	57 (100%)	95 (100%)	

p-valor < 0,05: significativo.

Pode-se observar que os maiores percentuais de falhas foram o turno 1 (42%), correspondendo o trabalho das 07 – 15 horas, as empilhadeiras recuperadoras (39%), o tipo de minério *Sinter* (37%), acionamento da chave de emergência (47%) e o embarque de minério (53%). Ainda é possível observar, na Tabela 1, diferenças significativas nas curvas de sobrevida para as variáveis: turno, tipos de minério e tipos de falha.

A probabilidade acumulada de sobrevida dos equipamentos avaliados, são representados por intermédio das suas respectivas curvas de sobrevida. Na Figura 5 apresenta-se as curvas de sobrevida para os turnos de trabalho.

Figura 5 – Curvas de probabilidade de sobrevida por turno de trabalho



Os transportadores que operaram no turno 1, apresentam a probabilidade de sobrevida em 1.304 horas, igual a 37,96%, com tempo mediano de sobrevivência de 1.115 horas. Nesse grupo, a probabilidade de os transportadores operarem sem falhas por mais de 1.951 horas foi de 28%.

Observa-se que a probabilidade de um transportador, que operou no turno 2, sobreviver até 1.304 horas foi de 19,05% e apresentaram um tempo mediano de sobrevivência menor que os outros dois turnos de, aproximadamente, 395 horas. Nesse grupo, 19,05% dos transportadores sobreviveram somente até 1.951 horas, enquanto que nos outros turnos, a probabilidade de sobrevivência foi maior.

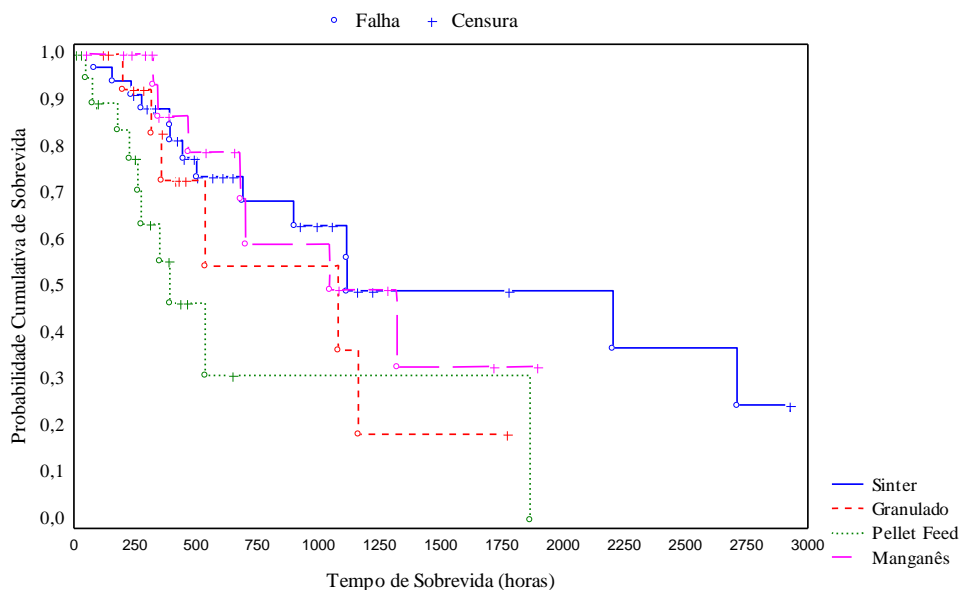
Os transportadores que operaram supervisionados pelo turno 3, têm 59,54% de sobrevivência em 1.304 horas, e apresentaram tempo mediado de sobrevivência de aproximadamente 1.318 horas. Nesse grupo, a probabilidade de sobrevida por mais de 1.951 horas, é de 44,65%. Houve diferença significativa entre os turnos 2 e 3 (p -valor = 0,007). Entretanto, não foi observada diferença significativa quando se comparou os turnos 1 e 2.

Na literatura as diferenças de sobrevida entre os turnos de trabalho podem ser consequência da jornada de trabalho ou de características da amostra estudada, por exemplo a maior concentração de trabalho no turno das 15 até 23 horas. Pesquisas como a de Goffeng et

al. (2018) apontam que diferentes jornadas de trabalho são fatores de risco para acidentes de trabalho ou vários outros efeitos negativos. Por isso, as diferenças na sobrevida, aparentemente, podem decorrer dessas características.

No trabalho elaborado por Rodrigues (1998), os turnos de trabalho são fatores que acarretam problemas de desempenho, produtividade, segurança e saúde ocupacional, constatando-se que os índices de acidentes pessoais e industriais no turno da noite são, relativamente, maiores quando comparados ao turno diurno. Na presente pesquisa, o turno 2 é propenso a ter mais falhas nos transportadores, isso porque é nesse período que mais se concentra o número de lotes de vagões para descarga, sendo um ponto de possível melhoria no sistema produtivo. Na Figura 6 apresentam-se as curvas de probabilidade de sobrevida para os tipos de minério.

Figura 6 – Curvas de probabilidade de sobrevida dos tipos de minério



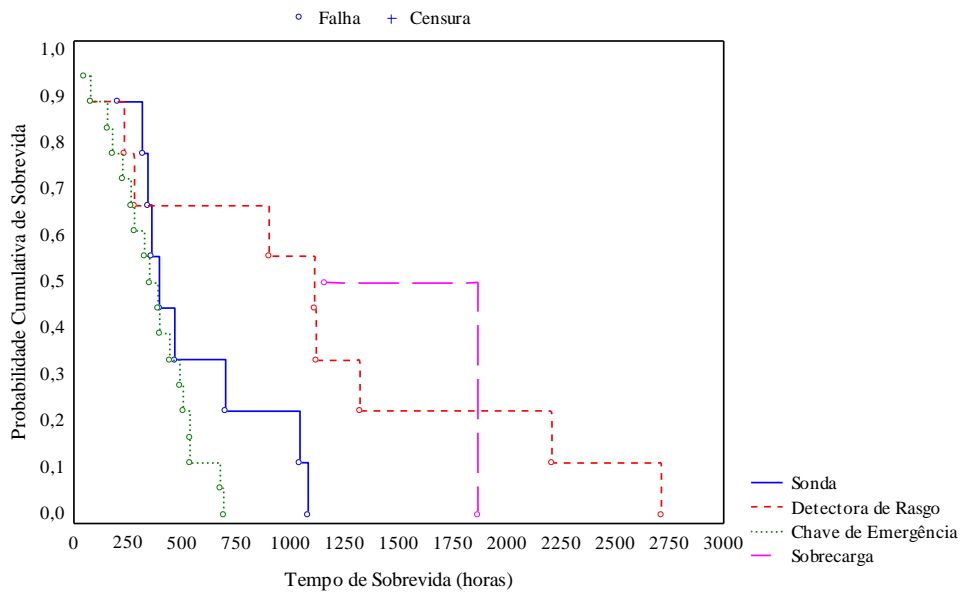
Observa-se que, para os transportadores que movimentaram o *Sinter*, a probabilidade de sobrevida em 1.304 horas de operação foi de 47,43%, com um tempo de sobrevida mediano de 1.117 horas. Quando se transportou o *Granulado*, a probabilidade de sobrevida dos transportadores foi 20,15% em 1.304 horas e um tempo de sobrevida mediano de 1.082 horas. Para o *Pellet Feed*, a probabilidade de falha com 1.304 horas foi de 32,86%, apresentando um tempo mediano de sobrevivência inferior aos outros minérios, 395 horas. Nesse tipo de minério, apenas 32,86% dos transportadores sobreviveram até 1.627 horas, enquanto que, nos outros tipos de minério, o tempo mediano foi maior. Em relação ao *Manganês*, a probabilidade de sobrevida foi 47,22% em 1.304 horas e um tempo de sobrevida mediano de 1.044 horas.

Quando foram comparados os tipos de minério, observou-se que a curva do *Sinter* diferiu do *Pellet Feed* (p-valor = 0,006) e a curva do *Pellet Feed* diferiu do Manganês (p-valor = 0,018). Não foi observada diferença significativa entre as demais relações.

Os resultados revelam-se coerentes com os observados na literatura quando se avalia os tipos de minério como agentes causadores de falhas em equipamentos. Os trabalhos de Lima, Alas e Brito (2016), Assumpção et al. (2015) e Schulze (2008) apontam que, para a movimentação de diferentes tipos de minérios, exige-se uma readaptação das rotas dos transportadores, principalmente para materiais mais finos, no caso do *Pellet Feed*. Material com menor granulometria tende a ocasionar mais falhas como entupimento nos chutes de transferência, impactando na produção por conta de paradas não programadas, na baixa performance operacional e na diminuição da confiabilidade do sistema produtivo.

Na Figura 7 apresentam-se as curvas de probabilidade de sobrevida para os transportadores pelos tipos de falha.

Figura 7 – Curvas de probabilidade de sobrevida pelos tipos de falhas



A probabilidade de um transportador, que apresentou falha por sonda, sobreviver até 933 horas é de 22,22% e o tempo mediano de sobrevivência é de aproximadamente 395 horas. Os transportadores que apresentaram falha no dispositivo detector de rasgo têm 55,56% de probabilidade de sobrevivência em 933 horas e apresentam um tempo mediano de sobrevivência de 1.115 horas. Nesse grupo, 11,11% dos transportadores possuem a probabilidade de sobrevida maior que 2.414 horas.

A probabilidade de sobrevivência dos transportadores falharem pela atuação da chave de emergência é de 11,11% em 637 horas. Esse tipo de falha apresenta um tempo mediano de sobrevivência inferior aos outros tipos de falha, com cerca de 371 horas. Os transportadores não apresentaram falhas de sobrecarga em 933 horas de operação e essa curva de sobrevivência decai para 50% no período de 1.822 horas. Nesse tipo de falha, o tempo mediano de sobrevivência de 1.513 horas.

Quando foram comparados os tipos de falhas, observou-se diferença significativa entre as curvas da sobrecarga, sonda e chave de emergência (p-valor = 0,003; p-valor = 0,0024; p-valor = 0,012) respectivamente. Ainda observou-se diferença entre as curvas de sobrevida da detectora de rasgo e a chave de emergência (p valor = 0,003), sendo que as demais relações não são significativas.

Os resultados obtidos neste estudo, em relação à quantidade de vagões e toneladas movimentadas, não foram comparados com a literatura por falta de estudos aplicados nesse processo industrial. A diferença na granulometria dos minérios pode diminuir ou aumentar a quantidade de toneladas movimentadas pelos vagões. Devido a esse fator, verifica-se que quanto maior for a granulometria do minério, o mesmo tende a ocupar mais espaço nos vagões diminuindo o peso total da carga movimentada, o contrário disso também é verdadeiro. Dessa forma, quanto mais vagões contendo minérios de maior volume e menor peso, menor será o impacto no sistema de movimentação de material, ou seja, nos transportadores considerados.

Deve-se destacar também a presença de umidade, pois, materiais mais finos como o *Pellet Feed* tendem a reter uma maior umidade, o que contribui de forma geral para o aumento do peso movimentado pelos vagões, colaborando para o aumento da taxa de operação dos transportadores, fazendo com que os transportadores trabalhem com uma maior carga o que consequentemente, influencia em falhas operacionais, como relatado no estudo de Fonseca, Souza e Paula (2019), em que condições severas de constantes carregamentos e descarregamentos de material, resultam em ciclos alternados de fadiga cuja intensidade pode ocasionar descontinuidades na estrutura dos transportadores.

Na etapa do ajuste do modelo de regressão, observou-se que o turno, os tipos de minério, a quantidade de vagões e toneladas movimentadas se mantiveram significativas. Na Tabela 2 apresentam-se os resultados do ajuste do modelo de regressão de Cox.

Tabela 2 – Resultados do ajuste do modelo de regressão de Cox univariado e multivariável para o tempo de sobrevida dos transportadores de granel sólido

Variável	HR bruta			HR ajustada		
	exp(β)	IC 95%	p-valor	exp(β) _a	IC 95%	p-valor
Turno						
Turno 1	1,0		0,021	1,0		0,007
Turno 2	2,019	(0,96 - 4,25)	0,064	2,602	(1,14 - 5,92)	0,023
Turno 3	0,608	(0,27 - 1,38)	0,234	0,645	(0,27 - 1,54)	0,325
Tipos de Minério						
Sinter	1,0		0,022	1,0		0,009
Granulado	1,759	(0,66 - 4,72)	0,262	1,707	(0,63 - 4,66)	0,296
Pellet Feed	3,586	(1,52 - 8,48)	0,004	4,568	(1,83 - 11,39)	0,001
Manganês	1,109	(0,44 - 2,82)	0,829	1,195	(0,46 - 3,10)	0,714
Vagões	1,01	(0,99 - 1,02)	0,180	0,209	(0,05 - 0,89)	0,035
Toneladas	1,0	(1,00 - 1,00)	0,174	1,015	(1,00 - 1,03)	0,033

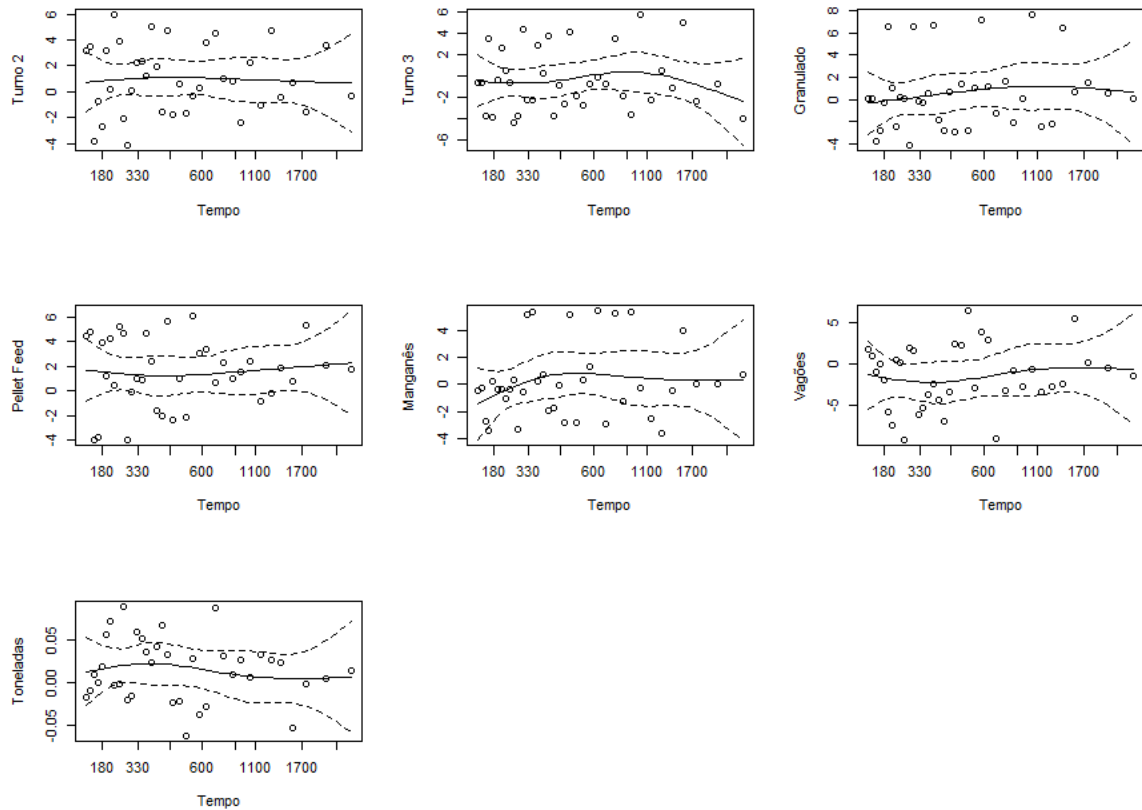
exp(β) = razão de riscos bruta (*hazard ratio* – HR); exp(β)_a = razão de riscos ajustada (*hazard ratio* – HR); IC = intervalos de confiança.

O teste de razão de verossimilhança indicou que a inclusão das covariáveis no modelo diminuiu de modo significativo a verossimilhança do modelo em relação ao modelo menos parcimonioso ($-2\ln L(0) = 262,00$; $-2\ln(\beta) = 238,46$) com (p-valor < 0,001). Em relação a análise bruta e ajustada das falhas dos equipamentos, observou-se um aumento significativo da razão de risco de falhas nos equipamentos quando se movimentam o *Pellet Feed*, apresentando-se como um importante fator de avaliação das falhas nos equipamentos. Ainda foi possível verificar que, as covariáveis quantidade de vagões e toneladas movimentadas passaram a ser significativas quando são analisadas com as demais covariáveis.

O poder explicativo das covariáveis no tempo de ocorrência do evento em estudo corresponde a 22,80% da variabilidade dos dados. O poder discriminatório e a acurácia do modelo ajustado obtido pela probabilidade de concordância (0,728) indicam que o poder preditivo se encontra na escala que varia de 0,7 a 0,8, dessa forma, tem-se um resultado discriminatório muito bom.

Para verificar as premissas de proporcionalidade do risco de cada covariável do modelo, utilizou-se os resíduos de Schoenfeld, teste de correlação linear com o tempo, a presença de *outliers*, por meio dos resíduos de martingale e *deviance* e pontos influentes, por intermédio dos resíduos *escore*. Os resíduos de Schoenfeld para as covariáveis são apresentados na Figura 8.

Figura 8 – Resíduos de Schoenfeld gerados pelo modelo de Cox ajustado

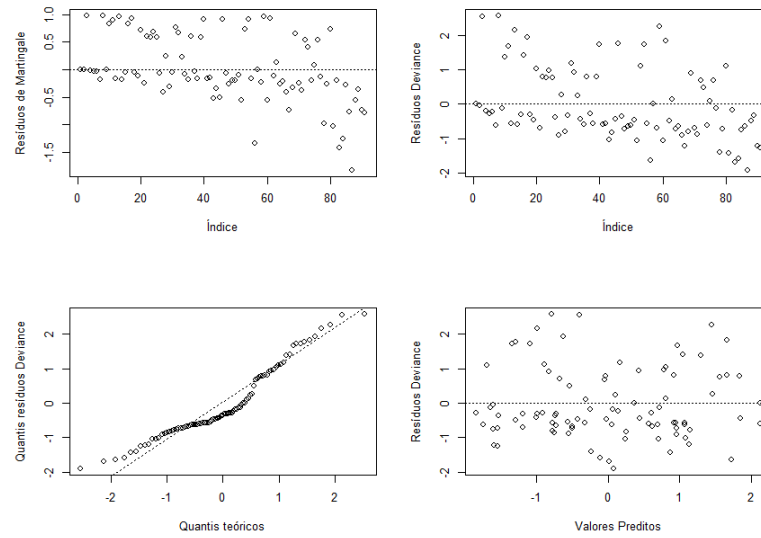


Observa-se na Figura 8 que a premissa de riscos proporcionais não é violada, em outras palavras, a reta está dentro dos intervalos de confiança da curva de suavização *spline* dos resíduos. Quando a suposição de riscos proporcionais é satisfeita não existe uma tendência sistemática no gráfico em relação ao tempo. O efeito do turno 2 é totalmente proporcional ao longo do tempo. O efeito do turno 3, no final do período de observação parece ser diferente do início, entretanto, como as observações são distintas nos dois instantes essa variação não é importante, sendo considerada proporcional. Para os tipos de minério, quantidade de vagões e toneladas é possível observar uma pequena variação temporal, dessa forma, essa variação pode ser atribuída à flutuação aleatória dos dados e os riscos também são considerados proporcionais ao longo do tempo.

O resultado do teste de correlação linear dos resíduos em relação ao tempo de sobrevivência (p -valor = 0,928), mostram que as covariáveis turno, tipos de minério, quantidade de vagões e toneladas movimentadas apresentam risco proporcional. Além disso, estimou-se a função de proporcionalidade global do modelo, confirmando este resultado.

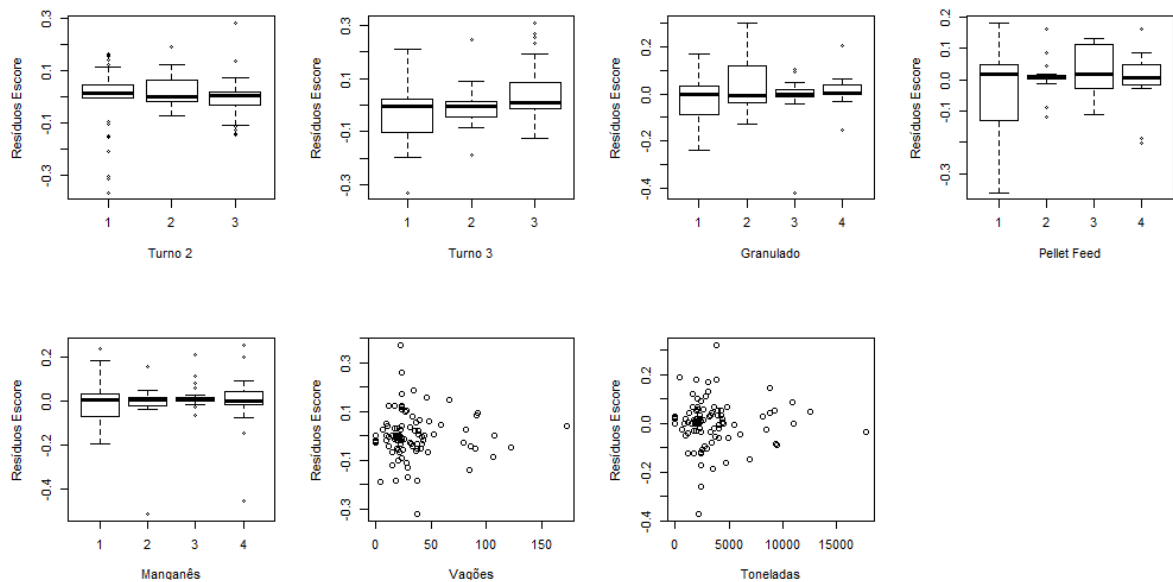
Na Figura 9 apresentam-se os gráficos de martingale e *deviance* para identificação de *outliers*.

Figura 9 – Resíduos de martingale e *deviance* para as covariáveis turno, tipos de minério, quantidade de vagões e toneladas movimentadas



Na Figura 9 é possível identificar que os valores variam em torno de $(-\infty, 1)$, não sendo simetricamente distribuídos e quando o tempo de sobrevivência é censurado, o resíduo torna-se negativo, o que atende aos pressupostos teóricos. Para os resíduos *deviance*, seja o gráfico quantil-quantil ou em relação aos valores preditos pelo modelo, verifica-se que os valores variam em torno de $[-2, 2]$, não detectando desvio de ajuste, o que atende aos pressupostos teóricos. Verifica-se pelo gráfico quantil-quantil que a distribuição dos resíduos gerados segue uma distribuição normal. Na Figura 10 são apresentados os resíduos *score* para o modelo ajustado.

Figura 10 – Resíduos de *score* para as covariáveis turno, tipos de minério, quantidade de vagões e toneladas movimentadas



Observa-se que os resíduos *escore* para todas as covariáveis apresentam uma escala reduzida e nenhuma indicação de pontos influentes no ajuste do modelo, permitindo uma estimação robusta da variância dos coeficientes da regressão. Dessa forma, pode-se afirmar que entre os modelos avaliados, o modelo com as covariáveis (turno, tipos de minério, quantidade de vagões e toneladas movimentadas) é o de melhor ajuste dos dados obtidos. A função de sobrevida e razão de riscos relativos do modelo é definida pelas equações (9) e (10):

$$\hat{S}_t = \hat{S}_0(t) \exp^{(0,956X_2 - 0,438X_3 + 0,535X_4 + 1,519X_5 + 0,178X_6 - 1,566X_7 + 0,015X_8)} \quad (9)$$

$$HR = \exp^{(0,956X_2 - 0,438X_3 + 0,535X_4 + 1,519X_5 + 0,178X_6 - 1,566X_7 + 0,015X_8)} \quad (10)$$

Os equipamentos operados no Turno 2 apresentaram risco de falhar 2,602 vezes (p-valor = 0,0023) quando comparados com o Turno 1. O minério *Pellet Feed* apresentou risco de falha de 4,568 vezes (p-valor = 0,001) quando comparado ao *Sinter*. O aumento do número de vagões contribuiu para uma redução de cerca de 20% (p-valor = 0,035) nas falhas, enquanto que, para a quantidade de toneladas carregadas houve aumento de 1,5% (p-valor = 0,033).

Os resultados deste estudo apontam para a presença de alguns fatores que atuam elevando o risco de falhas nos equipamentos. A probabilidade de sobrevida de 75% do sistema de movimentação de material granel equivale a um tempo de disponibilidade operacional de 444 horas. Observou-se uma diminuição significativa da sobrevida dos equipamentos no decorrer do tempo de operação, corroborando que a presença dos fatores avaliados atua elevando o risco de falhas dos equipamentos.

4. CONCLUSÃO

Esse artigo teve como objetivo aplicar os métodos incorporados na análise de sobrevida para estimar o tempo de vida em transportadores de granéis sólidos. É possível afirmar que o objetivo desse estudo foi plenamente atingido, uma vez que o desenvolvimento dessa pesquisa contribui de forma significativa para a compreensão dos conceitos e aplicações que envolvem o método empregado em dados reais, o que possibilita avaliar na prática, os resultados obtidos, assim como na disseminação do conhecimento dos mesmos.

A pesquisa apresenta uma contribuição original para a literatura, por ser o primeiro estudo a investigar os fatores de risco associados a falhas de equipamentos utilizados na

movimentação de minérios em uma planta industrial marítima portuária por meio da análise de sobrevida. Identificou-se que os turnos de trabalho, os tipos de minério, a quantidade de vagões e toneladas movimentadas se mostraram importantes preditores no modelo de regressão de Cox.

Constatou-se a importância da análise de sobrevida, sobretudo, em dados censurados, ou seja, um tempo parcial de observação, além de ser um método robusto para pesquisas em indústrias. Na prática, foi possível verificar que o Turno 2, por ser mais propenso a falhas, além de receber as maiores quantidades de minérios a serem descarregados e movimentados, torna-se um ponto de melhoria para o sistema produtivo, uma vez que identificou-se a necessidade de escalonamento da movimentação de material entre os turnos de trabalho, com o objetivo de não sobrecarregar a planta produtiva. O engenheiro de produção poderá priorizar com maior segurança o tempo em que ocorrerá as intervenções preventivas ou preditivas dos equipamentos, assim como outros métodos de manutenção, baseado pelo método que significativamente apresenta a maior probabilidade de sobrevida dos equipamentos.

A quantidade de dados faltantes e com tempo zero, foram analisados de maneiras distintas de acordo com os métodos computacionais utilizados. Dessa forma, os resultados dos logaritmos de verossimilhança para os métodos utilizados foram diferentes, não afetando de nenhuma forma as conclusões finais do estudo.

Embora a covariável tipos de falha apresenta diferenças significativas entre as curvas de sobrevida pelo estimador de Kaplan-Meier, quando modelada em conjunto com as outras covariáveis no modelo múltiplo, algumas perdem o poder de estimação devido a contribuições competitivas no modelo, por isso, optou-se por retirá-la do modelo do final.

Uma limitação presente no estudo é a ausência da informação da “idade” dos equipamentos, essa opção foi decorrente devido à complexidade e falta de histórico de implantação dos equipamentos na planta produtiva.

Sugere-se, para trabalhos futuros, uma aplicação da pesquisa para outros segmentos do setor portuário, considerando que, os resultados podem estabelecer evidências que serão de grande utilidade para o alcance das metas estabelecidas, para o aumento de confiabilidade dos equipamentos, para tomada de decisões mais assertivas e para as estratégias de manutenção nas organizações.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ALSYOUF, I. The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. **I. J. Production Economics**, Sweden, 2007. 70-78.
- ANDERSEN, P. K.; GILL, R. D. Cox's regression model for counting processes: a large sample study. **The annals of statistics**, v. 10, n. 4, p. 1100-1120, 1982.
- ASSUMPCÃO, M. E. et al. Aplicação do método dos elementos discretos na avaliação de chutes de escoamento de minérios de ferro itabiríticos. **Holos**, v. 7, n. 31, p. 34-42, 2015.
- BEMMENT, S. D. et al. Improving the reliability and availability of railway track switching by analysing historical failure data and introducing functionally redundant subsystems. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 232, n. 5, p. 1407-1424, 2018.
- BIANCHINI, A.; ROSSI, J.; ANTIPODI, L. A procedure for condition-based maintenance and diagnostics of submersible well pumps through vibration monitoring. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, v. 9, n. 5, p. 999-1013, October 2018.
- CARVALHO, M. S. et al. **Análise de sobrevivência: teoria e aplicações em saúde**. 2. ed. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2011. 432 p. ISBN 9788575412169.
- CHAMBERS, J. M.; HASTIE, T. J. **Statistical models in S**. Pacific Grove, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, v. 251, 1992.
- COLLETT, D. **Modelling survival data in medical research**. London: Chapman and Hall/CRC, 2015.
- CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2017. ISBN 978-85-97-01314-6.
- COX, D. R. Regression models and life tables. **Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)**, 34, 1972. 187-220.
- COX, D. R. Partial likelihood. **Biometrika**, 62, 1975. 269-276.
- CUTRIM, S. S. et al. Seis sigma na operação e logística portuária da vale: estudo de caso no terminal marítimo ponta da madeira. **Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios**, Florianópolis, 10, n. Edição Especial 1, 30 Abril 2017. 186-210.
- ELETROBRÁS, C. E. B. S. A. et al. **Correias transportadoras: guia básico**. Brasília: IEL/NC, 2009. 177 p. ISBN 978-85-87257-38-3.
- ERICSON, C. A. **Hazard analysis techniques for system safety**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2015.

- FACCHINI, S. J.; SELBITTO, M. A. Análise estratégica da gestão da manutenção industrial de uma empresa de metalmecânica. **E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial**, 7, n. 1, 2014. 49-66.
- FONSECA, M. C.; DE SOUZA, F. T.; DE PAULA, G. D. Verificação à fadiga de suportes de apoio soldados de um transportador de correia de alto-forno. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 15, n. 1, p. 168-182, 2019.
- GOFFENG, E. M. et al. Fluctuations in heart rate variability of health care workers during four consecutive extended work shifts and recovery during rest and sleep. **Industrial health**, v. 56, n. 2, p. 122-131, 2018.
- GOYAL, R.; WHELAN, M. J.; CAVALLINE, T. L. Characterising the effect of external factors on deterioration rates of bridge components using multivariate proportional hazards regression. **Structure and Infrastructure Engineering**, Charlotte, North Carolina, 24 Aug 2016. 01-12.
- GRAMBSCH, P. M.; THERNEAU, T. M. Proportional hazards tests and diagnostics based on weighted residuals. **Biometrika**, v. 81, n. 3, p. 515-526, 1994.
- HANAGAL, D. **Modeling survival data using frailty models**. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2011.
- KHALAF, A. B. et al. The effect of maintenance on the survival of medical equipment. **Journal of Engineering, Design and**, v. 11, n. 2, p. 142-157, 2013.
- KHALIL, J.; SAAD, S. M.; GINDY, N. An integrated cost optimization maintenance model for industrial equipment. **Journal of Quality in Maintenance**, v. 15, n. 1, p. 106-118, 2009.
- KLEINBAUM, D. G. Survival Analysis, a Self-Learning Text. **Biometrical Journal: Journal of Mathematical Methods in Biosciences**, v. 40, n. 1, p. 107-108, 1998.
- KLEINBAUM, D. G.; KLEIN, M. **Survival Analysis: A Self-Learning Text**. 2. ed. New York: Springer Publishing Company, 2005.
- LIMA, R. C.; ALAS, L. F.; BRITO, J. N. **Eliminação de queda de material e entupimento em chute através do projeto de um transportador de correia reversível**. CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Fortaleza: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. 2016. p. 1-9.
- MACHADO, L. F. M. O estimador de Kaplan-Meier: Novos desenvolvimentos e aplicações no contexto. **Sociedade Portuguesa de Estatística**, Lisboa, Outubro 2011. 56-62.
- MADEIRA, S.; INFANTE, P.; DIDELET, F. Use of survival models in a refinery. **REVSTAT – Statistical Journal**, 11, March 2013. 45-46.
- MENGUE, D.; SELBITTO, D. Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. **Produção Online**, v. 13, n. 2, p. 759-783, 2013.

MULT JR. Mult Jr Consultoria e Projetos, 2016. Disponível em:

<<http://www.multjr.com.br/portfolio/detail/projeto-correia-transportadora/>>. Acesso em: 01 Março 2018.

RAO, P. V. Applied survival analysis: regression modeling of time to event data. **Journal of the American Statistical Association**, v. 95, n. 450, p. 681-681, 2000.

ROBERT, J. G. Modeling Survival Data: Extending the Cox Model. **Journal of the American**, v. 97, n. 457, p. 353-354, 2002.

RODRIGUES, V. F. Principais impactos do trabalho em turnos: estudo de caso de uma sonda de perfuração marítima. **R Un Alfenas**, v. 4, p. 199-207, 1998.

SCHULZE, D. **Powders and Bulk Solids - Behaviors, Characterization, Storage and Flow**. Wolfsburg: Springer, 2008. 253 p.

SILVA, M. L. S.; CONCEIÇÃO, I. L. D.; FRANÇA, W. A. A importância da manutenção em motores diesel. **Exatas & Engenharia**, 3, n. 7, 2014. 54-61.

SLACK, ; BRANDON-JONES, A.; JHONSTON, R. **Administração da Produção**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2015. ISBN 9788597002676.

THERNEAU, T. M.; GRAMBSCH, P. M. **Modeling survival data: extending the Cox model**. New York: Springer-Verlag New York, 2000. ISBN 978-1-4419-3161-0.

UNES, L. et al. Eficiência Portuária: Estudo de caso no Terminal Marítimo Ponta da Madeira. **Anais do II CIDESPOT - Congresso Internacional de Desempenho Portuário**, Florianópolis, p. 1-23, 2 a 4 Dezembro 2015. ISSN 2447-4894.

VALE INFORMAR. Vale S.A. **Vale Brasil**, 07 Dezembro 2016. Disponível em: <<https://valeinformar.valeglobal.net/BR/MA/Paginas/Home-07-12-16.aspx?pdf=1#pdf-f3e43fe9-aa79-4041-9e6f-56179522f16f-card-920>>. Acesso em: 22 Fevereiro 2018.

VIEIRA, F. M. C. et al. The influence of thermal conditions from an environmentally controlled preslaughter lairage on mortality of broiler chickens. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, 68, n. 2, 2016. 475-482.

XIONG, X.; WU, J. A novel sample size formula for the weighted log-rank test under the proportional hazards cure model. **Pharmaceutical statistics**, 16, n. 1, 2017. 87-94.

YANG, L. et al. Hybrid preventive maintenance of competing failures under random environment. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 174, p. 130-140, June 2018. Acesso em: 10.1016/j.ress.2018.02.017.

5 CONCLUSÃO

Sob o ponto de vista acadêmico, o trabalho buscou contribuir para definição de estratégias e para tomada de decisão em relação a gestão da manutenção de equipamentos de movimentação de granéis sólidos. A construção de *insights* para novos estudos é pertinente, uma vez que se constatou na literatura acadêmica uma relativa escassez em aplicações práticas a dados reais da análise de sobrevida no contexto industrial. Diante do exposto, este trabalho justifica-se pela relevância do tema e pela flexibilidade de utilização da metodologia exposta.

Neste estudo investigou-se os fatores de risco associados a falhas de equipamentos utilizados no Terminal Marítimo de Ponta da Madeira. Os turnos de trabalho, os tipos de minério, a quantidade de vagões e toneladas movimentadas se mostraram importantes preditores no modelo de regressão de Cox.

Dessa forma, é possível afirmar que o objetivo desse estudo foi plenamente atingido, uma vez que o desenvolvimento dessa pesquisa contribui de forma significativa para a compreensão dos conceitos e aplicações que envolvem o método empregado em dados reais, o que possibilita avaliar na prática, os resultados obtidos, assim como na disseminação do conhecimento de tais resultados.

Constatou-se a importância da análise de sobrevida sobretudo, em dados censurados, ou seja, um tempo parcial de observação, além de ser um método robusto para pesquisas em indústrias. O engenheiro de produção poderá priorizar com maior segurança o tempo em que ocorrerá as intervenções preventivas ou preditivas dos equipamentos, assim como outros métodos de manutenção, baseado pelo método que significativamente apresente a maior probabilidade de sobrevida dos equipamentos.

A quantidade de dados faltantes e com tempo zero, foram analisados de maneiras distintas de acordo com os métodos computacionais utilizados. Dessa forma, os resultados dos logaritmos de verossimilhança para os métodos utilizados foram diferentes, não afetando de nenhuma forma as conclusões finais do estudo.

Embora a covariável tipos de falha apresenta diferenças significativas entre as curvas de sobrevida pelo estimador de Kaplan-Meier, quando modelada em conjunto com as outras covariáveis no modelo múltiplo, algumas perdem o poder de estimação devido a contribuições competitivas no modelo, por isso, optou-se por retirá-la do modelo do final.

Uma limitação presente no estudo é a ausência da informação da “idade” dos equipamentos, essa opção foi decorrente devido à complexidade e falta de histórico de implantação dos equipamentos na planta produtiva.

Sugere-se, para trabalhos futuros, uma aplicação da pesquisa para outros segmentos do setor portuário, considerando que, os resultados podem estabelecer evidências que serão de grande utilidade para o alcance das metas estabelecidas, para o aumento de confiabilidade dos equipamentos, para tomada de decisões mais assertivas e para as estratégias de manutenção nas organizações.

REFERÊNCIAS

- AALEN, O. O. Nonparametric inference for a family of counting processes. **The Annals of Statistics**, 1978. 701-726.
- ABRAMAN. **A Situação da Manutenção no Brasil**. Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos. Salvador, p. 23. 2013. 5º Congresso Mundial de Manutenção e Gestão de Ativos.
- ABREU, A. L. E. D.; NETO, A. C. **Método computacionalmente intensivo para o cálculo dos intervalos de confiança para valores da função de confiabilidade**. XVI Simpósio de Pesquisa operacional & Logística da Marinha. Rio de Janeiro: Escola de Guerra Naval - Urca. 2013. p. 1-10.
- AITA, J. C. L.; PEIXOTO, N. H. **Tecnologias e processos industriais II**. Santa Maria: Rede e-Tec, 2013. 84 p. ISBN 978-85-63573-33-9. Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria.
- ALSYOUF, I. The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. **I. J. Production Economics**, Sweden, 2007. 70-78.
- ANDERSEN, P. K.; GILL, R. D. Cox's regression model for counting processes: a large sample study. **The annals of statistics**, v. 10, n. 4, p. 1100-1120, 1982.
- ANDRADE, J. et al. Vulnerability of the elderly to sexually transmitted infections. **Acta Paulista de Enfermagem**, 30, n. 1, 2017. 8-15.
- ANDREOZZI, V.; CARVALHO, M. S. Sobrevivência de múltiplos eventos. **Sociedade Portuguesa de Estatística**, Lisboa, Outubro 2011. 73-80.
- ANTAQ. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. **ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários**, 24 Outubro 2017. Disponível em: <<http://web.antaq.gov.br/anuario/>>. Acesso em: 01 Março 2018.
- ARRUDA, J. J. D. A. A Colonia Brasil: história e historiografia. **Travesía (San Miguel de Tucumán)**, 17, n. 1, 2015. 7-29.
- ASSUMPÇÃO, M. E. et al. Aplicação do método dos elementos discretos na avaliação de chutes de escoamento de minérios de ferro itabiríticos. **Holos**, v. 7, n. 31, p. 34-42, 2015.
- BATTISTELLA, P. M. D. **Análise de sobrevivência aplicada à estimativa da vida de prateleira de salsicha**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 115. 2008.
- BEMMENT, S. D. et al. Improving the reliability and availability of railway track switching by analysing historical failure data and introducing functionally redundant subsystems. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 232, n. 5, p. 1407-1424, 2018.
- BIANCHINI, A.; ROSSI, J.; ANTIPODI, L. A procedure for condition-based maintenance and diagnostics of submersible well pumps through vibration monitoring. **International**

Journal of System Assurance Engineering and Management, v. 9, n. 5, p. 999-1013, October 2018.

BICHOU, K.; GRAY, R. A. A critical review of conventional terminology for classifying seaports. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 39, n. 1, January 2005. 75-92.

BOTELHO, F.; SILVA, C.; CRUZ, F. Epidemiologia explicada – análise de sobrevivência. **Acta Urológica**, 26, n. 4, 2009. 33-38.

BRESLOW, N. E. Contribuição à Discussão do artigo de D. R. Cox. **Journal of the Royal Statistical Society B**, 34, 1972. 216-217.

CARRASCO, C. G.; NAKANO, E. Y. Estimção intervalar para os parâmetros do modelo exponencial discreto: uma aplicação para dados de sobrevivência. **Nucleus**, 13, n. 1, 2016. 41-52.

CARVALHO, M. N. M. et al. Maintenance plan of a rice mill: study of the utilization of sigma software. **12th International Conference on Information systems & Technology Management - CONTECSI**, São Paulo, p. 4846-4868, 20-22 May 2015.

CARVALHO, M. S. et al. **Análise de sobrevivência: teoria e aplicações em saúde**. 2. ed. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2011. 432 p. ISBN 9788575412169.

CHAMBERS, J. M.; HASTIE, T. J. **Statistical models in S**. Pacific Grove, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, v. 251, 1992.

CLARK, T. G. et al. Survival analysis part I: basic concepts and fist analyses. **Br J cancer**, 89, 2003. 232.

CODEBA, C. D. D. E. D. B. Sistema Portuário Brasileiro. **Comapnhia das Docas do Estado da Bahia - Autoridade Portuária**, 2017. Disponível em: <<http://www.codeba.com.br/eficiente/sites/portalcodaba/pt-br/site.php?secao=sistemaportuariobrasileiro>>. Acesso em: 28 Fevereiro 2018.

COLLETT, D. **Modelling survival data in medical research**. London: Chapman and Hall/CRC, 2015.

COLOSIMO, E. A.; GIOLO, S. R. **Análise de Sobrevivência Aplicada**. São Paulo: Edgard Blücher, v. 1, 2006.

COLOSIMO, E. et al. Empirical comparisons between Kaplan-Meier and Nelson-Aalen survival function estimators. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, 72, n. 4, 2002. 299-308.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2017. ISBN 978-85-97-01314-6.

CORRÊA, H.; CORRÊA, C. **Administração da produção: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. São Paulo: Atrlas , 2010.

CORSON, A. **Manual of Best Management Practices For Port Operations And Model Environmental Management**. Purdue University. West Lafayette, p. 156. 2007.

COX, D. R. Regression models and life tables. **Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)**, 34, 1972. 187-220.

COX, D. R. Partial likelihood. **Biometrika**, 62, 1975. 269-276.

COX, D. R.; HINKLEY, D. V. **Theoretical Statistics**. London: Chapman and Hall, 1974.

COX, D. R.; OAKES, D. Analysis of survival data. **Chapman and Hall**, London, UK, 1984.

COX, D. R.; SNELL, E. J. A General Definition of Residuals. **Journal of the Royal Statistical Society B**, 30, 1968. 248-275.

CROWTHER, M. J.; LAMBERT, P. C. Parametric multistate survival models: Flexible modelling allowing transition-specific distributions with application to estimating clinically useful measures of effect differences. **Statistics in Medicine**, 2017. 1-24.

CUTRIM, S. S. et al. Seis sigma na operação e logística portuária da vale: estudo de caso no terminal marítimo ponta da madeira. **Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios**, Florianópolis, 10, n. Edição Especial 1, 30 Abril 2017. 186-210.

DA SILVA PEREIRA, T. N.; PEREIRA, P. J. The effect of the presence of censorship an application in lifetime data of electrical lamps. **Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications**, 03, n. 10, 30 Junho 2017. 74-83.

DETREGIACHI FILHO, E. et al. Otimização da performance da linha de produção mediante a implantação da Manutenção Produtiva Total. **Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção**, Curitiba, 5, n. 7, 2017. 3-18.

DOS SANTOS, M. J.; RODRIGUES, E. W. Modernização econômica e portuária: o caso do porto de São Sebastião (SP). **Revista do Desenvolvimento Regional, COLÓQUIO**, 13, n. 2, 2017. 33-52.

ELETROBRÁS, C. E. B. S. A. et al. **Correias transportadoras: guia básico**. Brasília: IEL/NC, 2009. 177 p. ISBN 978-85-87257-38-3.

EMIR, ., Class Mídia – Marketing e Comunicação. **Manhã Hoje**, 2017. Disponível em: <<http://maranhaohoje.com/itaqui-melhora-sua-posicao-no-ranking-da-anaq-e-ponta-da-madeira-lidera-movimento-de-cargas/>>. Acesso em: 01 Março 2018.

ENDRENYI, J. Aging maintenance and reliability. **IEEE Power & Energy Magazine**, p. 59-67, May/June 2006.

ERICSON, C. A. **Hazard analysis techniques for system safety**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2015.

FACCHINI, S. J.; SELLITTO, M. A. Análise estratégica da gestão da manutenção industrial de uma empresa de metalmeccânica. **E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial**, 7, n. 1, 2014. 49-66.

- FAGUNDES , A. et al. **Estudo de caso: Análise quantitativa de confiabilidade e disponibilidade de um torno CNC, baseado na metodologia RCM (Reliability Centred Maintenance), aplicado a área de manutenção industrial.** Anais do XXXI ENEGEP, Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte : ABEPRO. 2011.
- FALCÃO, A.; ANDERSON , R. C. Eficiência portuária: análise das principais metodologias para o caso dos portos brasileiros. **Journal of Transport Literature**, São José dos Campos, 6, n. 4, Outubro 2012. 133-146.
- FOGLIATTO, F.; RIBEIRO, J. **Confiabilidade e manutenção industrial.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 265 p. ISBN 978-85-352-3353-7.
- FONSECA, M. C.; DE SOUZA, F. T.; DE PAULA, G. D. Verificação à fadiga de suportes de apoio soldados de um transportador de correia de alto-forno. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 15, n. 1, p. 168-182, 2019.
- GOFFENG, E. M. et al. Fluctuations in heart rate variability of health care workers during four consecutive extended work shifts and recovery during rest and sleep. **Industrial health**, v. 56, n. 2, p. 122-131, 2018.
- GONÇALVES, W.; LOPES, M. R. Práticas de manutenção na gestão de operações: um estudo em empresas de distribuição de gás liquefeito de petróleo. **Brazilian Journal of Production Engineering-BJPE**, 3, n. 3, 2017. 01-18.
- GONZALEZ, M. M.; TRUJILLO, L. GONZALEZ, Maria Manuela; TRUJILLO, Lourdes. Reforms and infrastructure efficiency in Spain's container ports. **Transportation Research Part**, 42, 2008. 243-257.
- GOYAL, R.; WHELAN, M. J.; CAVALLINE, T. L. Characterising the effect of external factors on deterioration rates of bridge components using multivariate proportional hazards regression. **Structure and Infrastructure Engineering**, Charlotte, North Carolina, 24 Aug 2016. 01-12.
- GRAMBSCH, P. M.; THERNEAU, T. M. Proportional hazards tests and diagnostics based on weighted residuals. **Biometrika**, v. 81, n. 3, p. 515-526, 1994.
- HANAGAL, D. **Modeling survival data using frailty models.** Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2011.
- HARRELL JR; FRANK, E. **Regression modeling strategies: with applications to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis.** Springer, 2015.
- HINES, W. W. et al. **Probabilidade e estatística na engenharia.** Tradução de Vera Regina Lima de Farias Flores. Rio de Janeiro: LTC, 2011. ISBN 978-85-216-1474-6.
- JUNG, Y. S.; OH, J. Lifespan evaluation of traffic detector for Automated traffic recorders based on Weibull distribution. **Journal of Transportation Engineering**, 143, n. 9, 2017. 05017006.
- KAPLAN, E. L.; MEIER, P. Nonparametric estimation for incomplete observations. **Journal of the American Statistical Association**, 53, n. 282, 1958. 457-481.

KHALAF, A. B. et al. The effect of manintenance on the survival of medical equipment. **Journal of Engineering, Design and**, v. 11, n. 2, p. 142-157, 2013.

KHALIL, J.; SAAD, S. M.; GINDY, N. An integrated cost optimization maintenace model for industrial equipment. **Journal of Quality in Maintenance**, v. 15, n. 1, p. 106-118, 2009.

KLEINBAUM, D. G. Survival Analysis, a Self-Learning Text. **Biometrical Journal: Journal of Mathematical Methods in Biosciences**, v. 40, n. 1, p. 107-108, 1998.

KLEINBAUM, D. G.; KLEIN, M. **Survival Analysis: A Self-Learning Text**. 2. ed. New York: Springer Publishing Company, 2005.

KRASICH, M. How to estimate and use MTTF/MTBF would the real MTBF please stand up? **Reliability and Maintainability Symposium , RAMS**, 2009. 353-359. Annual IEEE.

LIMA, R. C.; ALAS, L. F.; BRITO, J. N. **Eliminação de queda de material e entupimento em chute através do projeto de um transportador de correia reversível**. CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Fortaleza: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. 2016. p. 1-9.

LINS, R.; FIGUEIREDO, D.; ROCHA, E. Não temos tempo a perder: uma introdução à análise de sobrevivência. **Revista Política Hoje**, 26, n. 1, 2017. 279-298.

LOUZADA, F.; FERREIRA, P. H.; DINIZ, C. A. R. On the impact of disproportional samples in credit scoring models: an application to a brazilian bank data. **Expert Systems With Applications**, Issue, v. 39, p. 8071-8078, September 2012.

MACHADO, L. F. M. O estimador de Kaplan-Meier: Novos desenvolvimentos e aplicações no contexto. **Sociedade Portuguesa de Estatística**, Lisboa, Outubro 2011. 56-62.

MADEIRA, S.; INFANTE, P.; DIDELET, F. Use of survival models in a refinery. **REVSTAT – Statistical Journal**, 11, March 2013. 45-46.

MARSON, M. D. A evolução da indústria de máquinas e equipamentos no Brasil: Dedini e Romi, entre 1920 e 1960. **Nova Economia**, Belo Horizonte, 3, Setembro/Dezembro 2014. 685-710.

MASCARENHAS, S. A. **Metodologia científica**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

MATTOS,. Versões E Interpretações: Revisitando a Historiografia Sobre a Abertura Dos Portos Brasileiros (1808). **HiSTOReLo. Revista de Historia Regional y Local**, 9, n. 17, 16 February 2017. 01-36.

MENDES, A. A.; RIBEIRO, J. L. D. Um estudo do suporte quantitativo necessário para a operacionalização da MCC. **Production**, 21, n. 4, 2011. 583-593.

MENDONCA, M.; CHUN, I. R.; ROCHA, M. E. C. Dynamic Fuzzy Cognitive Maps Applied in Realibility Centered Maintanance of Electric Motors. **IEEE Latin America Transactions**, 5, n. 5, 2017. 827-834.

MENGUE, D.; SELBITTO, D. Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. **Produção Online**, v. 13, n. 2, p. 759-783, 2013.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Manual do trabalho portuário e ementário**. MTE. Brasília, DF, p. 152. 2001.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL. Governo do Brasil - Portal Brasil. **MTPA**, 10 Julho 2017. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/07/movimentacao-nos-portos-brasileiros-cresce-em-2017>>. Acesso em: 28 Fevereiro 2018.

MIRSAEEDI, H. et al. Electricity Distribution System Maintenance Budgeting: A Reliability-Centered Approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2017.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Tradução de A. M. L Farias e V. R. F. L Flores. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. ISBN 978-85-216-3186-6.

MONTGOMERY, D. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Tradução de Verônica Calado. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. ISBN 978-85-216-3253-5.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Tradução de Verônica Calado. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MOSLEMI, N. et al. Mode-based reliability centered maintenance in transmission system. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, 27, n. 4, 2016. 1-12.

MULT JR. Mult Jr Consultoria e Projetos, 2016. Disponível em: <<http://www.multjr.com.br/portfolio/detail/projeto-correia-transportadora/>>. Acesso em: 01 Março 2018.

NAKANO, E. Y.; CARRASCO, C. G. Uma avaliação do uso de um modelo contínuo na análise de dados discretos de sobrevivência. **Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional**, 7, n. 1, 2006. 91-100.

NARA, E. O. B. et al. Análise e introdução de técnicas de manutenção de classe mundial no setor de manutenção elétrica para aumentar a disponibilidade de equipamentos. **Workshop em Sistemas e Processos Industriais**, Santa Cruz do Sul, 8-18 Maio 2013.

NASCIMENTO, L. P. **Elaboração de projetos de pesquisa**: monografia, dissertação, tese e estudo de caso, com base em metodologia científica. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

NELSON, W. Theory and applications of Hazard Plotting for Censored Failure Data. **Technometrics**, 1972. 945-965.

NETO, A. B. S.; VENTILARI, S. X. **O trabalho portuário e a modernização dos portos**. Curitiba: Juruá, 2001.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, 04, n. 02, 2008. 01-16.

- PAGANO, M.; GAUVREAU, K. **Princípios da Bioestatística**. São Paulo, SP. 2004.
- PAPOILA, A. L. Censura intervalar: modelação de dados do estado atual. **Sociedade Portuguesa de Estatística**, Lisboa, Outubro 2011. 35-46.
- PEREIRA, M. J. **Técnicas Avançadas de Manutenção**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2010.
- PETO, R. Experimental survival curves for interval-censored data. **Journal of the Royal Statistical Society, series C**, 1973. 86-91.
- PINTO, A. K.; XAVIER, J. N. **Manutenção: função estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2007.
- PRODANOV, C. C.; DE FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. Rio Grande do Sul: Editora Feevale, v. 2, 2013.
- RAO, P. V. Applied survival analysis: regression modeling of time to event data. **Journal of the American Statistical Association**, v. 95, n. 450, p. 681-681, 2000.
- ROBERT, J. G. Modeling Survival Data: Extending the Cox Model. **Journal of the American**, v. 97, n. 457, p. 353-354, 2002.
- RODRIGUES, V. F. Principais impactos do trabalho em turnos: estudo de caso de uma sonda de perfuração marítima. **R Un Alfenas**, v. 4, p. 199-207, 1998.
- SALONEN, A.; MATS, D. Cost of poor maintenance: A concept for maintenance performance improvement. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 1, 2011. 63-73.
- SANTOS, V. A. D. **Manual prático da manutenção industrial**. 3. ed. São Paulo: Ícone, 2010. ISBN 978-85-274-0926-1.
- SCAPIN, C. A. **Análise Sistêmica de Falhas**. 2. ed. Nova Lima: Falconi, 2014. 193 p. ISBN 9788598254623.
- SCHULZE, D. **Powders and Bulk Solids - Behaviors, Characterization, Storage and Flow**. Wolfsburg: Springer, 2008. 253 p.
- SILVA, G. L. D. Análise Bayesiana de Modelos de Sobrevida Baseados em Processos de Contagem. **Sociedade Portuguesa de Estatística**, Lisboa, outono 2011. 63-72.
- SILVA, J. F. et al. Analysis of the time to relieving pain in patients with chronic non-specific low back pain via cox proportional hazard model. **Ciência e Natura**, Santa Maria, 39, n. 2, 2017. 233-243.
- SILVA, M. L. S.; CONCEIÇÃO, I. L. D.; FRANÇA, W. A. A importância da manutenção em motores diesel. **Exatas & Engenharia**, 3, n. 7, 2014. 54-61.

- SILVA, R. M. et al. Utilização da análise de agrupamentos (cluster analysis) nos serviços portuários: um estudo dos serviços de praticagem no Brasil e nos Estados Unidos. **INOVAE- Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation**, 4, n. 1, 2016. 45-56.
- SILVEIRA, L. V. A.; COLOSIMO, E. A.; PASSOS, J. R. D. S. Generalized Log-Normal Model for Grouped Survival Data. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, 39, n. 15, 2010. 2659-2666.
- SIQUEIRA, I. P. D. **Manutenção centrada na confiabilidade**: manual de implementação. Rio de Janeiro: Qualitymark, v. 1, 2005. 408 p.
- SLACK, ; BRANDON-JONES, A.; JHONSTON, R. **Administração da Produção**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2015. ISBN 9788597002676.
- SOUZA, C. D. **Organização e gerência da manutenção**: planejamento, programação e controle de manutenção. 4. ed. São Paulo: All Print , 2011.
- THERNEAU, T. M.; GRAMBSCH, P. M. **Modeling survival data**: extending the Cox model. New York: Springer-Verlag New York, 2000. ISBN 978-1-4419-3161-0.
- TODINOV, M. T. Reliability Analysis Based on the Losses from Failures. **Risk Analysis**, 26, n. 2, 3 March 2006. 311.
- TOVAR, A. C. D. A.; FERREIRA, G. C. M. A Infra-Estrutura Portuária Brasileira: O Modelo Atual e Perspectivas para seu Desenvolvimento Sustentado. **Revista do BNDES, RIO DE JANEIRO**, 13, n. 25, Junho 2006. 209-230.
- TURNBULL, B. W. The empirical distribution function with arbitrarily grouped, censored and data. **Journal of the Royal Statistical Society, series B**, 38, 1976. 290-295.
- UNES, L. et al. Eficiência Portuária: Estudo de caso no Terminal Marítimo Ponta da Madeira. **Anais do II CIDESPORT - Congresso Internacional de Desempenho Portuário**, Florianópolis, p. 1-23, 2 a 4 Dezembro 2015. ISSN 2447-4894.
- VALE INFORMAR. Vale S.A. **Vale Brasil**, 07 Dezembro 2016. Disponível em: <<https://valeinformar.valeglobal.net/BR/MA/Paginas/Home-07-12-16.aspx?pdf=1#pdf-f3e43fe9-aa79-4041-9e6f-56179522f16f-card-920>>. Acesso em: 22 Fevereiro 2018.
- VIANA, H. R. G. **PCM, planejamento e controle de manutenção**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. 192 p.
- VIEIRA, F. M. C. et al. The influence of thermal conditions from an environmentally controlled preslaughter lairage on mortality of broiler chickens. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, 68, n. 2, 2016. 475-482.
- VIEIRA, G. B. B. et al. Governança e regulação dos serviços portuários: estudo comparativo dos serviços de praticagem em portos brasileiros e espanhóis. **Revista Gestão Industrial**, 11, n. 3, 2015. 01-25.
- WUTTKE, R. A.; SELBITTO, M. A. Availability and position in bath-tube curve calculation of a petrochemical process valve. **Revista Produção Online**, 8, n. 4, 2008. 1-23.

XENOS, H. G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva**. Nova Lima: Falconi, v. 2, 2014. 312 p. ISBN 978-85-98254-64-7.

XIONG, X.; WU, J. A novel sample size formula for the weighted log-rank test under the proportional hazards cure model. **Pharmaceutical statistics**, 16, n. 1, 2017. 87-94.

YANG, L. et al. Hybrid preventive maintenance of competing failures under random environment. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 174, p. 130-140, June 2018.