



PROJETO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO DE CONFIABILIDADE E MELHORIA DE TRANSPORTADORES DE CORREIA DE CALCÁRIO EM UMA FÁBRICA DE CIMENTO

Por,
Patrick Duarte Ferraz - 11/0055942

Brasília, 20 de novembro de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO DE CONFIABILIDADE E MELHORIA
DE TRANSPORTADORES DE CORREIA DE
CALCÁRIO EM UMA FÁBRICA DE CIMENTO**

POR,

Patrick Duarte Ferraz

Relatório submetido ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Antônio Piratelli Filho, UnB/ ENM (Orientador)

Prof. Antônio Manoel Dias Henriques, UnB/ ENM

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira UnB/ ENM

Brasília, 20 de novembro de 2019

Dedicatória

Aos meus pais, Brito e Zú, e Lara por todo apoio e amor dedicados a mim durante essa jornada.

Patrick Duarte Ferraz

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, que ao longo desta longa jornada de muito aprendizado esteve sempre presente, intercedendo por mim nos momentos mais difíceis pelos quais passei e me concedendo bençãos e graças para seguir em frente com fé. Aos meus pais, fonte de toda a minha inspiração e resiliência para estar aqui em busca desse sonho. A minha namorada, Lara, minha companheira e melhor amiga, que sempre me apoiou e motivou a seguir buscando meus objetivos com fé e esperança. Aos meus amigos, pessoas especiais que se tornaram uma família para mim ao longo de todos esses anos e pelos quais tenho um carinho enorme.

Gostaria de agradecer também a todas aquelas pessoas que de alguma forma possibilitaram que eu esteja concluindo essa etapa da minha formação profissional. Aos mestres que transmitiram tão sabiamente seus conhecimentos e experiências na execução da profissão mais nobre que existe. Em especial, ao Professor Taygoara Felamingo de Oliveira, para o qual não existem palavras suficientes que possam expressar toda a minha gratidão por não medir esforços em me ajudar no momento mais crítico desta jornada. Sua dedicação e apoio foram bençãos de Deus na minha vida. A Lico e Arnóbia, pessoas que amo e admiro como se fossem meus pais, e que tornaram possível a minha estadia em Brasília desde o início. A Vilomar e Andrecksa, por todo apoio e carinho que sempre demonstraram ter comigo ao longo desses anos. E aos colegas de estágio, por contribuírem tão profundamente com a minha formação na transmissão de conhecimentos e por apresentarem um caminho pelo qual posso seguir profissionalmente.

Patrick Duarte Ferraz

RESUMO

O presente trabalho propõe o estudo de confiabilidade e melhoria mecânica de transportadores de correia de calcário de uma fábrica de cimento. Os transportadores de correia são utilizados para transporte de grandes quantidades de calcário, na forma de pedras ou pó, a distâncias variadas. Durante a operação, existe a ocorrência de falhas, as quais acontecem com certa frequência, e a consequente parada da linha de produção resulta em grandes custos para a fábrica de cimento estudada. Com base na seleção dos transportadores de maior criticidade, de acordo com critérios pré-definidos, a análise da confiabilidade desses equipamentos deve ser feita a partir da modelagem dos seus tempos de vida, determinando o tempo médio entre falhas (MTBF, da sigla em inglês para *mean time between failures*). A partir disso, realiza-se uma análise do projeto e dos esforços mecânicos envolvidos na operação do transportador mais crítico e melhorias são analisadas e implementadas para melhorar o seu desempenho e minimizar a ocorrência de falhas.

ABSTRACT

The current report aims to present a reliability and mechanical analysis of cement plant's limestone belt conveyor. The belt conveyors are used to move huge amounts of limestone, on a shape of rocks or powder, for long distances. During their operation, failures can happen at certain frequency, resulting on the interruption of the production line and costing significant financial losses for the cement plant studied. Based on pre-determined criteria, the most critical belt conveyor is selected, and their reliability analysis must be done by modeling their life time, determining their MTBF, or mean time between failures. As a result of that, an analysis of the machine design and mechanical forces that are applied under operation at the most critical conveyor belt is presented and improvements are studied and applied in order to enhance its performance and decrease the occurrence of failures.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. A CONFIABILIDADE NO CENÁRIO DO MERCADO ATUAL	1
1.2. PROBLEMA PROPOSTO	2
1.3. OBJETIVO.....	3
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. INDÚSTRIA DE CIMENTO E O PROCESSO PRODUTIVO.....	5
2.1.1. PANORAMA DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA	5
2.1.2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO.....	7
2.2. TRANSPORTADORES DE CORREIA	9
2.2.1. INTRODUÇÃO.....	9
2.2.2. COMPONENTES DE UM TRANSPORTADOR DE CORREIA	11
2.2.3. MECANISMOS DE FALHA EM TRANSPORTADORES DE CORREIA.....	22
2.3. FUNDAMENTOS DA ANÁLISE EM CONFIABILIDADE	24
2.3.1. CONCEITO DE CONFIABILIDADE.....	24
2.3.2. MEDIDAS DE CONFIABILIDADE	25
2.3.3. DISTRIBUIÇÕES DE PROPABILIDADE	29
2.3.4. TAXAS DE FALHAS, FASES DE VIDA E ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO	35
2.3.5. MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO E ADEQUAÇÃO DE AJUSTE	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.2. INTERPRETAÇÃO E MÉTODO DE ANÁLISE DE DADOS	42
3.3. METODOLOGIA PARA ESTUDO DE MELHORIA DE TC'S	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1. ESTUDO DE CONFIABILIDADE DOS TRANSPORTADORES DE CORREIA	54
4.2. ESTUDO DE MELHORIA DO TRANSPORTADOR DE CORREIA A1J05	60
4.2.1. BREVE DESCRIÇÃO DO TRANSPORTADOR DE CORREIA A1J05	60
4.2.2. HISTÓRICO DE FALHA	62
4.2.3. ANÁLISE E ESTUDO DE MELHORIA DO TC.....	63
4.2.3.1. ANÁLISE APLICADA A CORREIA TRANSPORTADORA.....	63
4.2.3.1.1. SELEÇÃO DE CORREIA TRANSPORTADORA	66
4.2.3.1.2. CÁLCULO DO TRANSPORTADOR DE CORREIA	74
4.2.3.2. MUDANÇAS APLICAS AO DIÂMETRO DOS TAMBORES	91
4.2.3.3. REDIMENSIONAMENTO DO EIXO DO TAMBOR DE DOBRA	93
4.3. ESTUDO DE CONFIABILIDADE DO TC A1J05 aPÓS MELHORIAS REALIZADAS	106
5. CONCLUSÕES	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	114
APÊNDICES	117
ANEXOS	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Venda acumulada de cimento no mercado interno entre 2014 e 2016 (SNIC, 2016)	6
Figura 2.2. Venda acumulada de cimento no mercado interno entre 2016 e 2018 (SNIC, 2018)	7
Figura 2.3. Fluxo de fabricação de cimento (ABCP, 2019)	8
Figura 2.4. Transportador de correia (Arquivo pessoal)	10
Figura 2.5. Componentes de um transportador de correia (MERCÚRIO, s/d).....	11
Figura 2.6. Componentes básicos de uma correia transportadora de lona (à esquerda) e de aço (à direita) (MERCÚRIO, s/d)	13
Figura 2.7. Componentes do acionamento (NBR 6177)	14
Figura 2.8. Tipos de Tambores (lisos e com revestimento à esquerda, aletado à direita) (MERCÚRIO, s/d)	15
Figura 2.9. Tipos de roletes (roletes triplos convencionais à esquerda, roletes de impacto à direita) (MERCÚRIO, s/d).....	17
Figura 2.10. Conjunto de alimentação (mesa, guia lateral e chute de alimentação) (NBR 6177)	18
Figura 2.11. Desviador em V (NBR 6177)	19
Figura 2.12. Triper (NBR 6177)	20
Figura 2.13. Limpadores em "V" interno (MERCÚRIO, s/d)	20
Figura 2.14. Tipos de raspadores (MERCÚRIO, s/d).....	21
Figura 2.15 -Representações da distribuição exponencial (Fogliatto e Ribeiro, 2011 ...	30
Figura 2.16. Função de risco para (a) $\gamma = 0,5$; (b) $\gamma = 2,0$; (c) $\gamma = 3,6$ (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011)	32
Figura 2.17. Função de risco da Lognormal para $\mu = 1$ e $\sigma = 0,5$ (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011)	34
Figura 2.18. Curva da banheira (adaptado LAFRAIA, 2001; SELLITTO, 2005)	35
Figura 2.19. Curvas da banheira para componentes mecânicos (à esquerda) e elétricos (à direita) (RIBEIRO, 1995)	36
Figura 3.1. Tela de supervisor do processo Britagem. Correias A1J02, A1J03, A1J05, A1J06, A1J07, A1J08, A1J09, A1J10 (em vermelho)	40
Figura 3.2. Tela de supervisor do processo Depósito. Correias L1J02, L1J03, L1J04, L1J05 (em vermelho)	41
Figura 3.3. Tela de supervisor do processo Depósito. Correias R3A02, R3A07 (em vermelho)	41
Figura 3.4. Tela de supervisor do processo Moagem de Cru. Correias R3A08, R3A09, R3A11, R3J02 (em vermelho)	42
Figura 3.5. Layout do Sistema PI Central - Gerenciamento de Paradas	43
Figura 3.6. Layout da janela de registro de informações sobre parada de equipamento.....	43
Figura 3.7. Gráfico de intensidade x número de paradas das correias estudadas	45
Figura 3.8. Gráfico de intensidade por frequência de origem de parada.....	48
Figura 3.9. Intensidade por frequência de modos de falha em TCs	49
Figura 3.10. Cavalete sem rolete de carga (Arquivo Pessoal).....	50
Figura 3.11. Correia Desalinhada (Arquivo Pessoal)	50
Figura 3.12. Acúmulo de material entre tambor de dobra estudado no TC (Arquivo Pessoal)	51
Figura 4.1. Taxa de Falha das correias A1J05(esquerda), A1J11 (centro) e R3J02 (direita), respectivamente (ProConf)	54
Figura 4.2. Papel de Probabilidade da correia transportadora A1J05 (ProConf).....	55
Figura 4.3. Papel de Probabilidade da correia transportadora A1J11(ProConf)	56
Figura 4.4. Papel de Probabilidade da correia transportadora R3J02 (ProConf)	56

Figura 4.5. Função de Risco $h(t)$ das correias A1J05 (à esquerda), A1J11 (centro) e R3J02 (à direita) (ProConf)	59
Figura 4.6. Função de Confiabilidade $R(t)$ das correias A1J05 (à esquerda), A1J11 (centro) e R3J02 (à direita) (ProConf)	59
Figura 4.7. Transportador de correia A1J05 (Arquivo pessoal)	61
Figura 4.8. Esquema do transportador de correia A1J05	61
Figura 4.9. Gráfico de intensidade por frequência de paradas incidentais	62
Figura 4.10. Gráfico de impacto por frequência dos modos de falha	63
Figura 4.11. Mesa de impacto do transportador A1J05 (Arquivo Pessoal)	64
Figura 4.12. Desgaste da correia A1J05 (Arquivo Pessoal)	65
Figura 4.13. Diagrama de análise de causa	66
Figura 4.14. Correia com carcaça de Nylon-Nylon (MERCÚRIO, s/d)	68
Figura 4.15. Correia com carcaça de aramida (MERCÚRIO, s/d)	68
Figura 4.16. Resistência a abrasão da cobertura das correias Mercúrio	72
Figura 4.17. Instalação da correia de aramida (Arquivo Pessoal)	72
Figura 4.18. Instalação da correia de aramida (Arquivo Pessoal)	73
Figura 4.19. Instalação da correia de aramida (Arquivo Pessoal)	73
Figura 4.20. Fator A (FAÇO, 1996)	76
Figura 4.21. Fator B (FAÇO, 1996)	76
Figura 4.22. Seleção de série de roletes (FAÇO, 1996)	77
Figura 4.23. Rolo de carga (FAÇO, 1996)	77
Figura 4.24. Rolo de retorno (FAÇO, 1996)	78
Figura 4.25. Rolo de impacto (FAÇO, 1996)	78
Figura 4.26. Conjunto de roletes (FAÇO, 1996)	79
Figura 4.27. Roletes instalados na A1J05 (FAÇO, 1996)	79
Figura 4.28. Fator j (FAÇO, 1996) (FAÇO, 1996)	80
Figura 4.29. Peso do rolo (FAÇO, 1996) (FAÇO, 1996)	80
Figura 4.30. Série de roletes e seus respectivos rolamentos (FAÇO, 1996)	81
Figura 4.31. Fatores de segurança dos rolamentos (S_r) (FAÇO, 1996)	82
Figura 4.32. Esquema de transportador (FAÇO, 1996)	83
Figura 4.33. Espaçamento entre roletes (FAÇO, 1996)	83
Figura 4.34. Potência N_V para acionar o transportador vazio a 1 m/s (FAÇO, 1996)	85
Figura 4.35. Potência N_1 para deslocar 100 t/h de material em um comprimento L (m) na horizontal (FAÇO) 1996)	85
Figura 4.36. Potência N_h para elevar ou descer 100 t/h de material de uma altura H (m) (FAÇO, 1996)	85
Figura 4.37. Potência N_g para vencer o atrito das guias laterais a 1 m/s (FAÇO, 1996)	85
Figura 4.38. Eficiência (FAÇO, 1996)	86
Figura 4.39. Descrição do acionamento do transportador A1J05 (FAÇO, 1996)	86
Figura 4.40. Métodos de esticamento de correias (FAÇO, 1996)	88
Figura 4.41. Determinação do método de esticamento da correia (FAÇO, 1996)	88
Figura 4.42. Fator de abraçamento (K) (FAÇO, 1996)	89
Figura 4.43. Esquema de TC (FAÇO, 1996)	90
Figura 4.44. Diâmetro dos tambores do A1J05 (FAÇO, 1996)	91
Figura 4.45. Diâmetro dos tambores para correia de aramida (MERCÚRIO, s/d)	92
Figura 4.46. Posição do tambor de dobra estudado no esquema do TC	93
Figura 4.47. Posição do tambor de dobra estudado no TC (Arquivo pessoal)	94
Figura 4.48. Chaveta no eixo do rolo de dobra indicada por seta (Arquivo pessoal)	95
Figura 4.49. Posição do tambor de dobra no desenho técnico (arquivo pessoal)	96
Figura 4.50. Resultante radial R aplicado no tambor. CEMA (2014)	96
Figura 4.51. Diagrama de corpo livre do eixo do tambor movido	97
Figura 4.52. Cálculo de carga dinâmica equivalente e seus coeficientes (NSK, 2013) .	100
Figura 4.53. Coeficiente de velocidade (à esquerda) e coeficiente de vida (à direita) (NSK, 2013)	101
Figura 4.54. Conjunto rolamento-bucha (SKF, 2015)	102
Figura 4.55. Mancal SNN 520-617 (SNK, 2013)	102
Figura 4.56. Vedações (SNK, 2013)	103
Figura 4.57. Anel de Fixação (RINGFEDER, 2016)	104

Figura 4.58. Princípio de funcionamento do anel de fixação (FAÇO, 1996)	105
Figura 4.59. Anel de fixação RINGFEDER RFN 7012 (RINGFEDER, 2016)	105
Figura 4.60. Gráfico de intensidade por frequência da A1J05 desde Junho/19).....	106
Figura 4.61. Histograma da função de risco $h(t)$ (ProConf)	107
Figura 4.62. Gráficos de papéis de probabilidade (ProConf)	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Modos de falhas de correias transportadoras (Diniz, Hélio & Coelho Dutra, Douglas & Oliveira, Nicolás & Gonçalves Braga, Gilberto & José Pacheco Pujatti, Fabrício, 2015).	23
Tabela 3.1. Tag de identificação de processos da produção de cimento	39
Tabela 3.2. Tag de identificação de correias transportadoras de calcário da fábrica de cimento	40
Tabela 3.3. Classificação de paradas incidentais da fábrica de cimento estudada	44
Tabela 3.4. Número de horas e paradas registrados no gráfico da Figura 3.6	45
Tabela 3.5. Conjunto amostral de dados de tempo até falha da correia A1J05	46
Tabela 3.6. Conjunto amostral de dados de tempo até falha da correia A1J11	46
Tabela 3.7. Conjunto amostral de dados de tempo até falha da correia R3J02	47
Tabela 4.1 - Nível de Significância para ajuste dos dados da correia A1J05 (ProConf) ..	57
Tabela 4.2 - Nível de Significância para ajuste dos dados da correia A1J11 (ProConf) ..	57
Tabela 4.3 - Nível de Significância para ajuste dos dados da correia R3J02 (ProConf) ..	57
Tabelas 4.4 (à esquerda), 4.5 (centro) e 4.6 (à direita) - Resultado dos ajustes de dados das correias A1J05, A1J11 e R3J02, respectivamente (ProConf)	58
Tabela 4.7 - Especificação do transportador A1J05	67
Tabela 4.8 - Especificação correia NN (MERCÚRIO, s/d)	68
Tabela 4.9 - Especificação correia de aramida (MERCÚRIO, s/d).....	68
Tabela 4.10 - Matriz de decisão	69
Tabela 4.11 - Análise do critério de custo das correias	70
Tabela 4.12 - Especificações do Transportador A1J05	75
Tabela 4.13 - Resultados	81
Tabela 4.14 - Resultados para tensão mínima T_0	84
Tabela 4.15 - Potências obtidas.	85
Tabela 4.16 - Dados para o cálculo da tensão mínima na correia.....	87
Tabela 4.17 - Fator de abraçamento (K).....	89
Tabela 4.18 - Diâmetro dos tambores do A1J05 (atual e novo).	93
Tabela 4.19 - Resultado para o diâmetro do eixo	98
Tabela 4.20 - Especificação de mancais de acordo com posição	104
Tabela 4.21 - Especificações do anel de fixação RFN 7012.....	106
Tabela 4.22 - Horas paradas e número de paradas da A1J05	107
Tabela 4.23 - Tempos entre falhas da A1J05 desde Junho/19	107
Tabela 4.24 - Nível de Significância para ajuste dos dados da correia A1J05 (ProConf) 109	

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

f	Função densidade de probabilidade	
F	Função distribuição acumulada de probabilidade	
R	Função de Confiabilidade	
h	Função de risco	
H	Função de risco acumulada	
T	Variável aleatória	[h]
P	Função probabilidade	
E	Expectância	
K	Fator de acionamento	
Q	Capacidade de carga	[t/m ³]
B	<i>Largura da correia</i>	[pol]
V	Velocidade do transportador	
d	Diâmetro	[mm]
f	Flecha máxima no eixo	[mm]
R	Resultante radial	[kN]
C	Carga dinâmica nos rolamentos	[Kgf]
W	Peso	[Kgf]
K	Fator de serviço	
N	Potência	[HP]

Símbolos Gregos

λ	Parâmetro da distribuição exponencial	
γ	Parâmetro de forma da distribuição <i>Weibull</i>	
θ	Parâmetro de escala da distribuição <i>Weibull</i>	
Γ	Função Gama	
σ	Parâmetro de forma da distribuição Lognormal	
μ	Parâmetro de forma da distribuição Lognormal	
Φ	Função de distribuição da distribuição normal padronizada	
ϕ	Função de densidade da distribuição normal padronizada	
χ^2	Teste Qui-Quadrado	
α	Ângulo de abraçamento da correia no tambor	[°]
Θ	Coefficiente de atrito	
μ	Arco de abrasamento da correia no tambor de acionamento	[°]
η	Rendimento total	
β	Ângulo de inclinação dos roletes laterais	[°]
γ	Peso específico do material	[t/m ³]

Subscritos

0	idênticas
f	falharam
s	sobreviventes
d	dinâmica
r	radial
r	rolo

<i>m</i>	material
<i>0</i>	mínima
<i>adm</i>	admissível

Sobrescritos

`	Derivada primeira
``	Polegada

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Técnica Brasileira
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
FGV	Fundação Getúlio Vargas
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
K-S	Teste de Kolmogorov-Smirnov
TC	Transportador de Correia
CDP	<i>Castodur Diamond Plate</i>
PI	<i>Plant Information</i>
FAÇO	Fábrica de Aço Paulista
PCM	Planejamento e Controle da Manutenção

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o escopo geral do trabalho. A abordagem sobre a Confiabilidade, problema proposto, objetivo e organização adotada.

1.1. A CONFIABILIDADE NO CENÁRIO DO MERCADO ATUAL

Diante de um cenário econômico modernizado e competitivo, a indústria e comércio dos mais variados segmentos tem desenvolvido a percepção de que a prevenção de falhas em equipamentos ou produtos não se resume somente a uma ação que resulta em gastos não desejados. O conceito da prevenção de falhas e seu custo agregado se redefiniu e tornou-se um ideal estratégico que visa proporcionar um retorno positivo a médio e longo prazo. Este ideal corrobora com a manutenção da competitividade e sobrevivência das empresas ou organizações, contribuindo com seu possível sucesso e destaque no mercado comercial globalizado.

As exigências deste mercado, o qual impõe, de forma cada vez mais significativa suas necessidades de qualidade, preço e prazos a serem cumpridos, faz com que as empresas entrem em um processo constante de busca por melhorias, tanto do ponto de vista conceitual como técnico. Na indústria, a competitividade crescente tem exigido melhorias e reduções de custos em processos produtivos (SIQUEIRA, 2009). Neste contexto, a adoção de métodos de prevenção de falhas surge visando auxiliar neste processo. Uma contribuição possível deste método seria, por exemplo, reduzir a indisponibilidade de equipamentos críticos que podem vir a contribuir no desempenho da fábrica (FAGUNDES et al., 2018). Outros possíveis exemplos seriam a aplicação de métodos de prevenção de falhas que apresentem potencial para aumentar o desperdício de matéria-prima em processo, atrasar prazos de entrega, aumentar custos, ou mesmo influenciar na qualidade do produto. Todos esses possíveis cenários resultam em um possível descontentamento por parte dos clientes, o que acaba por gerar danos à imagem da empresa (CERVEIRA; SELLITO, 2015).

Diante deste cenário, surge a necessidade de implementação de análises baseadas em conceitos de Confiabilidade, que visam estabelecer uma redução na probabilidade de ocorrência de falhas em produtos, equipamentos ou processos que impactem de alguma forma na qualidade dos processos e seus resultados pelas empresas.

A Confiabilidade, segundo Halpern (1978), é a probabilidade de que um determinado item consiga cumprir algum objetivo especificado sob condições ambientais especificadas em um período de tempo especificado. Ou seja, a definição apresentada remete ao conceito de “confiança” de que um determinado componente, equipamento ou processo desempenhe sua função requerida, dentro de um período de tempo especificado (LAFRAIA, 2001).

Indicadores e funções importantes surgem a partir das análises centradas em conceitos de Confiabilidade. Dentre eles, função de Confiabilidade $R(t)$, a taxa de risco ou taxa de falha $\lambda(t)$ e o MTBF – *Mean Time Between Failure*. Na representação das probabilidades de falha, distribuições de probabilidade são atribuídas, uma vez que as distribuições relacionam um conjunto de valores de determinados parâmetros analisados com a sua probabilidade de ocorrência (PIAZZA, 2000). Dentre as distribuições de probabilidade possíveis, as mais utilizadas para descrever tempos até a falha de componentes e sistemas são: Exponencial, *Weibull*, Gama e Lognormal (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

Por meio de um estudo de Confiabilidade é possível, a partir de estimativas, caracterizar o comportamento dos indicadores e funções resultantes das análises realizadas para um determinado componente, equipamento ou sistema. Tais comportamentos são melhor determinados por meio do estudo baseado nos tempos das falhas ocorridas, no qual se terá uma melhor interpretação do comportamento da taxa de falha correspondente. A modelagem dos tempos até a falha é, portanto, central em estudos de Confiabilidade (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

A avaliação feita por meio da Confiabilidade faz possível mensurar e analisar o impacto sobre variáveis importante dos processos, tais como performance, manutenibilidade e segurança que um produto pode oferecer sem que sofra uma falha prematura que acabe por gerar gastos imprevistos. Dessa forma, a Confiabilidade surge como um ramo da Engenharia o qual consegue atuar em todas as fases de desenvolvimento de um produto ou processo (VACCARO, 1997).

Deve-se, portanto, considerar a Confiabilidade como uma ferramenta estratégica, que desempenha não somente uma função técnica ou de engenharia, mas que também possui uma relação estreita na determinação de garantias e responsabilidades, influenciando diretamente na saúde financeira de qualquer processo produtivo.

1.2. PROBLEMA PROPOSTO

Dentre os muitos cenários possíveis de aplicação de estudos de Confiabilidade, a indústria é, sem dúvida, uma das áreas pioneiras na implementação dos primeiros estudos nessa área. As necessidades de aumentar a disponibilidade dos equipamentos através do aumento de confiabilidade e prever o ciclo de vida dos mesmos para elaboração de estratégias otimizadas de atuação, deram amplitude para o desenvolvimento da área de Engenharia de Confiabilidade dentro dos setores de manutenção de unidades fabris de grandes empresas no mercado.

A indústria cimenteira, responsável pela produção de cimento, é um dos ramos da indústria na qual a área de Engenharia de Confiabilidade se faz presente. Nas unidades fabris responsáveis pela produção de cimento, existe uma infinidade de processos, os quais atuam de maneira coordenada, de acordo com um fluxograma de produção, a fim de viabilizar a obtenção deste produto. Nestes processos,

existem inúmeros tipos de equipamentos que capacitam a produção. Dentre estes, as máquinas de elevação e transporte, tais como correias transportadoras, elevadores de caneca, regueiras, roscas transportadoras, dentre outras, compõe a maioria dos equipamentos presentes nestas unidades fabris, e são responsáveis pelo transporte de material processado dentro de processos específicos, ou entre processos.

Dentre os vários tipos de equipamento citados, as correias transportadoras são os que se encontram em maior número no processo produtivo do cimento, e por isso, são equipamentos considerados de grande relevância e impacto dentro do processo produtivo.

Dada as características do processo nas quais essas correias estão inseridas, existe uma reincidência significativa de paradas operacionais destes equipamentos. Estas paradas ocorrem por inúmeros fatores, que vão desde decisões gerenciais que decidem pela parada do equipamento de forma planejada, até casos críticos em que ocorrem falhas nessas correias motivadas por algum evento incidental. Esse tipo de falha possui grande impacto no processo produtivo, promovendo a parada de linhas inteiras de produção, e gerando grandes prejuízos financeiros.

Tomou-se como base para descrição do cenário descrito dados correspondentes a transportadores de correia que fazem o transporte exclusivo de calcário, matéria-prima básica do cimento (SANTI, 2003), de uma fábrica localizada nas proximidades de Sobradinho, região administrativa do Distrito Federal. A fábrica faz parte de um dos maiores grupos empresariais do Brasil, com grande atuação no setor de produção de cimento, bem como outros setores estratégicos como siderurgia, e mineração, e atualmente está presente em mais de 20 países.

1.3. OBJETIVO

O presente projeto tem como objetivo a elaboração de um estudo de melhoria mecânica de transportadores de correia de calcário da fábrica descrita. Considerando que existe uma grande quantidade de transportadores que desempenham a função requerida, inseridas em diferentes processos e ambientes, sob diferentes condições operacionais, e que apresentam níveis de criticidade distintos dentro dos processos, optou-se por, previamente ao estudo mecânico, realizar um estudo de confiabilidade dessas correias.

O estudo de Confiabilidade dará condições de se avaliar a efetividade da melhoria mecânica que será aplicada aos equipamentos com base na estimativa de funções e indicadores característicos da análise de Confiabilidade, tal como a taxa de falha $\lambda(t)$ e o MTBF – *Mean Time Between Failures*, antes e após a realização da melhoria. Além disso, o estudo de Confiabilidade auxiliará no mapeamento e identificação dos transportadores que se apresentam com maior probabilidade de falha, direcionando a atividade de melhoria mecânica para os considerados mais críticos na fábrica neste momento.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Este trabalho é dividido em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo de Introdução, apresenta-se a ideia geral do estudo realizado, a partir de uma breve apresentação sobre a Confiabilidade e sua atuação no cenário do mercado atual, seguida pela apresentação do problema proposto e os objetivos desejados a partir da realização deste estudo.

O segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, se propõe inicialmente a apresentar um breve panorama da indústria cimenteira e como se dá seu processo produtivo, detalhando-se cada etapa do mesmo. A importância dessa primeira abordagem se deve ao fato de que o presente estudo se aplicará no contexto desta indústria. Na sequência, apresenta-se a fundamentação teórica da Confiabilidade, ferramenta que será utilizada para realização da análise dos equipamentos estudados no contexto citado.

O capítulo se encerra com a apresentação dos transportadores de correia e seus componentes, equipamento alvo do estudo de Confiabilidade proposto e que está presente com grande relevância dentro da indústria cimenteira.

O terceiro capítulo, Materiais e Métodos, apresenta a metodologia aplicada na apreensão dos dados correspondentes as paradas dos transportadores de correia de calcário de uma fábrica de cimento, a organização e interpretação destes dados, a fim de se determinar, de acordo com critérios de criticidade descritos, quais transportadores serão objeto do estudo de Confiabilidade. Em seguida, apresenta-se a metodologia aplicada para identificação dos modos de falha do transportador considerado mais crítico e como essas falhas serão tratadas e resolvidas por meio do estudo de melhoria implementado.

O capítulo quatro, Resultados e Discussões, realiza-se o estudo de Confiabilidade dos transportadores de correia selecionados, caracterizando os comportamentos de confiabilidade, de probabilidade de falha e taxa de falha a partir de modelagem dos tempos até falhas dessas correias. Dessa forma, identifica-se por meio das principais medidas de Confiabilidade o transportador de correia mais crítico e desenvolve-se um estudo de melhoria mecânica deste equipamento baseado em seu histórico operacional e de manutenção, a fim de aumentar sua confiabilidade. Um novo estudo de Confiabilidade é feito a fim de comprovar/mensurar os efeitos das melhoras feitas no equipamento.

O quinto capítulo, Conclusões, apresenta uma visão geral do estudo de Confiabilidade realizado, e das melhorias implementadas no transportador de correia selecionado com base no direcionamento dado por este estudo. Com isso, demonstra-se a importância da realização de atividades de engenharia no setor de manutenção industrial baseadas em conceitos e parâmetros relacionados a Confiabilidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma breve abordagem acerca da indústria do cimento, contexto no qual se aplica este estudo, fundamentação teórica acerca da Confiabilidade e transportadores de correia e seus componentes são apresentados nesse capítulo.

O capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão da literatura que serviu de base para o desenvolvimento do presente estudo. Para isso, é introduzido brevemente uma visão geral da indústria de cimento, contexto no qual se aplica o presente estudo, detalhando etapas do seu processo produtivo. As correias transportadoras, as quais são essenciais para viabilizar todo o processo produtivo do cimento, são apresentadas a seguir detalhando-se sua função operacional, componentes, normas que regem seu dimensionamento e como ela se enquadra dentro do processo produtivo mencionado. Para concluir, a fundamentação teórica sobre Confiabilidade é apresentada, demonstrando-se as funções de confiabilidade, distribuições de probabilidade estudadas e métodos utilizadas para verificação e ajuste dos dados.

2.1. INDÚSTRIA DE CIMENTO E O PROCESSO PRODUTIVO

2.1.1. PANORAMA DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Desde o início do século XX, a utilização do cimento pode ser considerada como uma espécie de “marca” da civilização atual. Ao influenciar diretamente no cenário de desenvolvimento do ramo de construção civil, o cimento tornou-se uma solução econômica em grande escala, atendendo aos tipos mais diversificados de demanda gerada por este setor, que vai desde de viabilizar a moradia humana até tornar possível grandes obras da engenharia. Sua matéria-prima, calcário, é abundante e relativamente barata (SILVA, 2017). Logo, devido ao baixo custo, tornou-se viável a sua utilização em obras da construção civil a nível global.

Com atuação marcante em empresas, tanto locais como em grandes grupos empresariais de relevância internacional, a indústria de cimento se faz presente em praticamente todos os países do mundo. Com a implantação de novas unidades integradas, os investimentos dispendidos pela indústria cimenteira, a nível mundial, situam-se entre US\$ 180,00 e US\$ 200,00/ton/ano de cimento ou clínquer (SILVA, 2017). Dados revelavam que a produção mundial de cimento em 2013 foi um pouco superior 4.000 milhões de toneladas, o que representa um crescimento de aproximadamente 8% em relação a produção de 2012, que registrou 3.700 milhões de toneladas. No cenário de produção de cimento a nível global, apenas a China, Índia e EUA mantiveram suas posições no ranking comparativo 2005-2013 de acordo com relatório do *The European Cement Association* (2013).

A produção de cimento em uma perspectiva global, ainda de acordo com *The European Cement Association* (2013), passaria por um contínuo crescimento. Neste cenário, apareciam com destaque os países de economia emergente, como a China, Índia. Em contraste a isso, a União Europeia apontava para uma queda na produção nos últimos anos motivada pela recessão econômica enfrentada por alguns dos países integrantes do bloco econômico, tais como Espanha, Itália e Grécia.

No Brasil, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2012), o consumo per capita de cimento atingiu o valor de 353 kg/hab.ano em 2012. O valor apresentado evidenciou a necessidade de expansão da indústria no Brasil no período, visto que este número se apresentava abaixo do patamar de países desenvolvidos, apesar de representar uma ascensão quando comparado aos valores registrados em anos anteriores. A tendência de expansão da indústria cimenteira no país foi algo observado no período, com a abertura de 36 novas fábricas entre 2004 e 2014, segundo a SNIC (2016). No entanto, com a crise econômica que atingiu o Brasil a partir de 2010, se intensificando em 2014, houve uma retração no consumo de cimento entre 12% e 15% já em 2016 (SNIC, 2016), conforme observado na **Figura 2.1**. Em 2017 e 2018, a tendência de retração se manteve, com um consumo aparente de cimento (vendas no mercado interno + importações) totalizando 52,9 milhões de toneladas em 2018, o que representa uma queda 1,5% em relação ao consumo registrado em 2017 (SNIC, 2018). Essa retração se deve, principalmente, ao aumento dos custos de produção, diminuição do consumo interno e alto endividamento das empresas, que como estratégia de se manter no mercado, acabaram por fechar unidades, racionalizando seus custos. No ano de 2018, ainda houve impactos significativos decorrentes da greve dos caminhoneiros, do período eleitoral em curso, e da própria desaceleração da economia (SNIC, 2018). A **Figura 2.2** apresenta um panorama desse impacto.

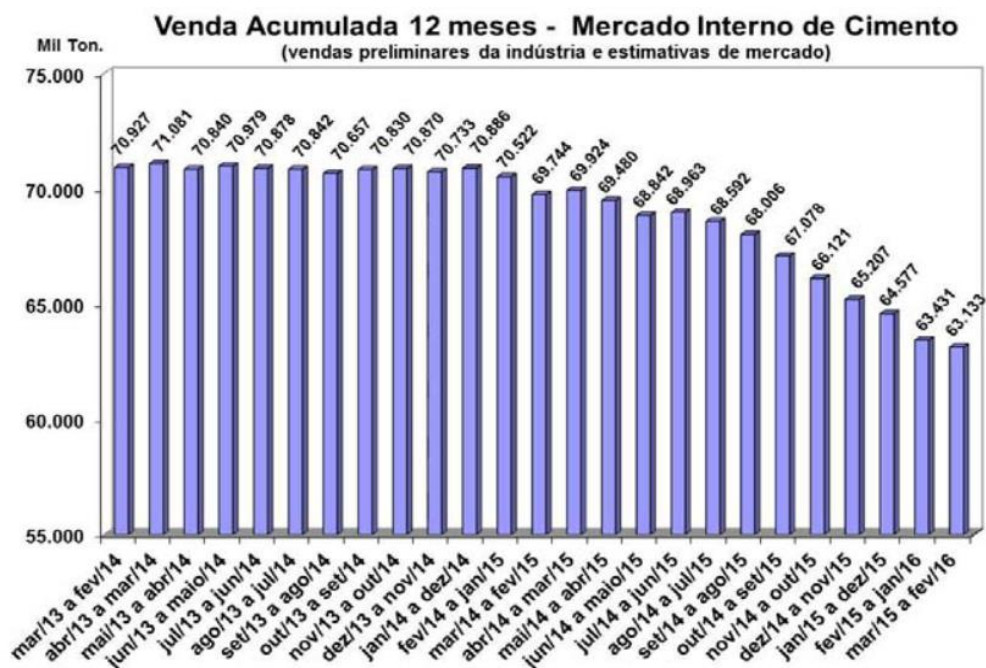


Figura 2.1. Venda acumulada de cimento no mercado interno entre 2014 e 2016 (SNIC, 2016).

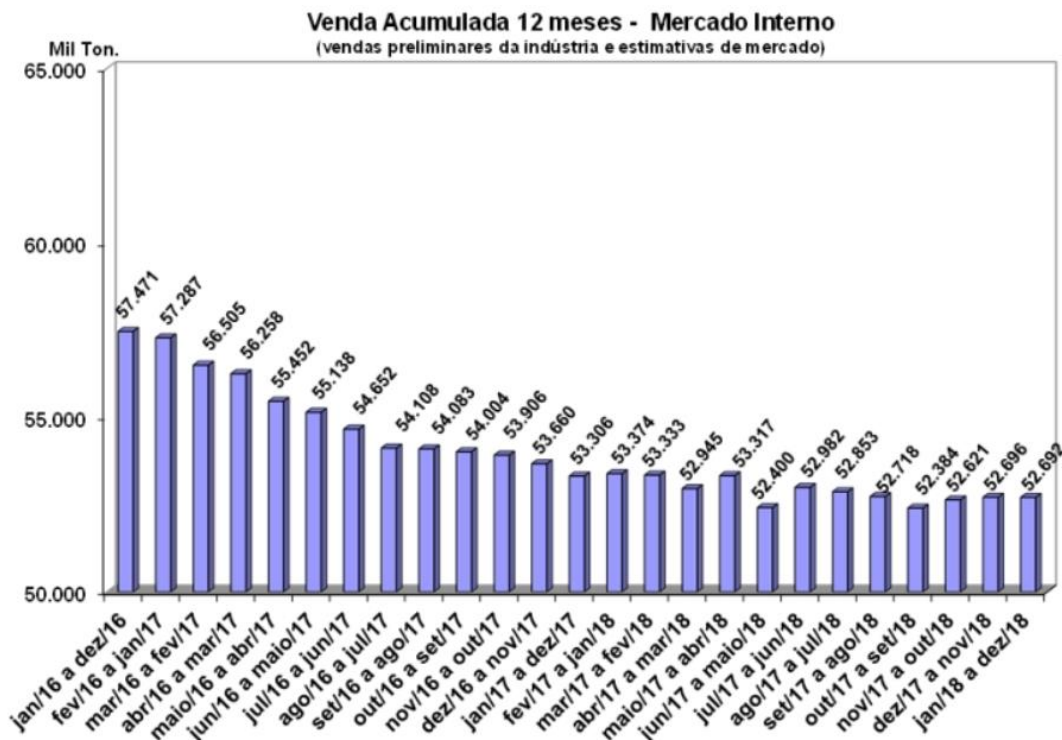


Figura 2.2. Venda acumulada de cimento no mercado interno entre 2016 e 2018 (SNIC, 2018).

No ano de 2019, com o início de novos mandatos nos governos federal e estaduais, tem-se registrada uma melhora da confiança de maneira geral, o que compreende a expectativa de consumidores, da indústria e do setor de construção civil. Em pesquisa realizada pela Fundação Getúlio Vargas – FGV, a confiança da indústria avançou 0,5 ponto percentual em dezembro de 2018, segunda alta seguida registrada pelo indicador (SNIC, 2018). Já para Paulo Camilo, presidente do SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, a expectativa para o setor é de crescimento da ordem de 3% já no ano de 2019, encerrando as sucessivas quedas registradas para o setor (SNIC, 2018).

2.1.2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO

O sistema de produção de uma indústria cimenteira tem duas atividades principais: extração de matéria-prima e o processo de fabricação do cimento (SILVA, 2017). Para viabilizar este processo, a instalação das plantas industriais deve ser feita próxima as jazidas de calcário, matéria-prima principal do cimento (SANTI, 2003).

O processo de fabricação em uma indústria cimenteira ocorre em variadas etapas, cada uma delas com grande importância para a fabricação de um produto homogêneo e de ótima qualidade. Tais fatores são essenciais para garantir a credibilidade da empresa no mercado.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2019), as principais etapas do fluxo de fabricação do cimento são ilustradas na **Figura 2.3** e detalhadas conforme segue:

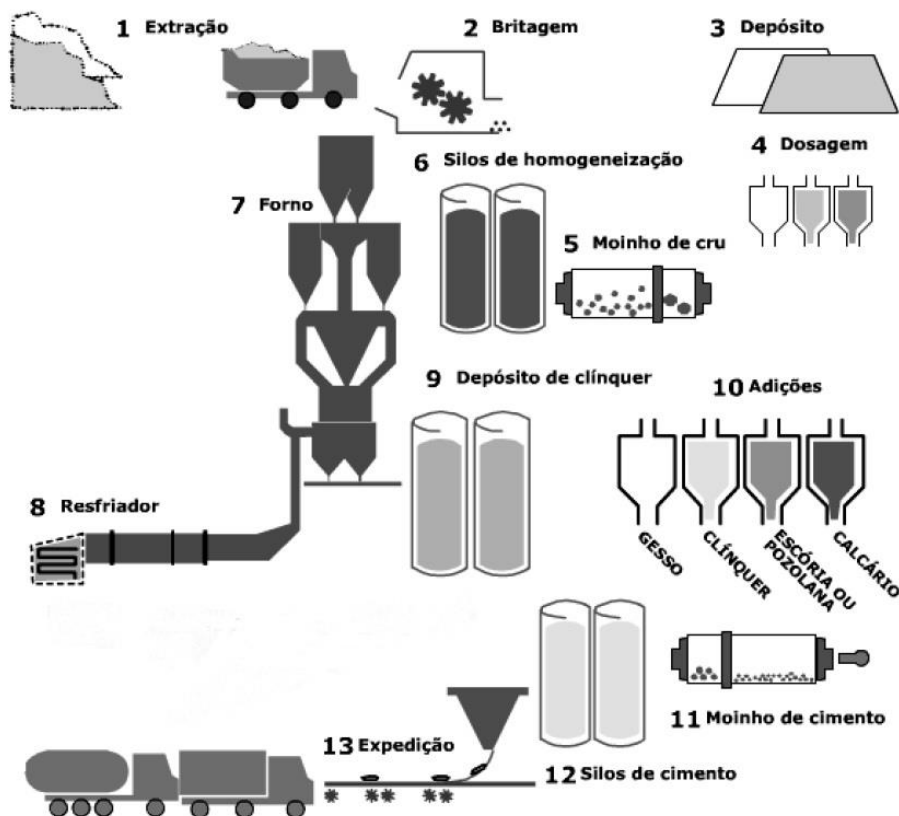


Figura 2.3. Fluxo de fabricação de cimento (ABCP, 2019).

1 – Extração: O calcário é a principal matéria-prima para a fabricação do cimento. Sua extração pode ocorrer de jazidas subterrâneas ou a céu aberto – situação mais comum no Brasil. Na etapa de extração, utilizam-se explosivos para o desmonte de rocha. Outro componente extraído nesta etapa é a argila. Em ambos os casos, um plano de gerenciamento de exploração mineral é necessário para preservar o ambiente.

2 – Britagem: O calcário extraído é transportado em caminhões até a instalação de britagem, onde é reduzido a dimensões adequadas ao processamento industrial. Esse tratamento permite eliminar uma grande parte de impurezas presentes no calcário. A argila, por ser mole, não passa pela britagem.

3 – Depósito: Calcário e argila são estocados separadamente. Na baía de cada material, um equipamento se encarrega de misturar as cargas, a fim de assegurar uma pré-homogeneização. Nesta fase, as matérias-primas são submetidas a diversos ensaios.

4 – Dosagem: O composto de calcário (90%) e argila (10%) é dosado para ser triturado no moinho de cru. Essa dosagem é efetuada com base em parâmetros químicos preestabelecidos – os chamados módulos químicos, que dependem das características composicionais dos materiais estocados e são controlados por balanças dosadoras.

5 – Moagem de Cru: A farinha crua formada pela mistura de calcário e argila passa por moagem em moinho de bolas, rolo ou barras, onde se processa o início da mistura das matérias-primas e ao mesmo tempo sua pulverização, de modo a reduzir o tamanho das partículas a 0,05 mm em média.

6 – Silos de Homogeneização: A mistura crua, devidamente dosada e com a granulometria adequada, conhecida como farinha, deve ter sua homogeneização assegurada para permitir uma perfeita combinação dos elementos formadores do clínquer. A homogeneização é executada em silos verticais de grande porte através de processos pneumáticos e por gravidade.

7 – Pré-aquecimento (Clinquerização): Dos silos de homogeneização a farinha é introduzida no forno, passando antes por pré-aquecimento (ou pré-calcinadores), equipamentos que aproveitam o calor dos gases provenientes do forno e promovem o aquecimento inicial do material. No forno rotativo, constituído de um cilindro de aço (revestido por tijolos refratários) com comprimento de 50m a 150m e diâmetro de 6m, a mistura é calcinada até 1450°C, resultando no clínquer, produto com aspecto de bolotas escuras.

8 – Resfriador: Um resfriador promove a redução da temperatura a 80°C, aproximadamente. A clinquerização se completa nesta etapa, quando ocorre uma série de reações químicas que influenciarão a resistência mecânica do concreto nas primeiras idades, o calor de hidratação, o início de pega e a estabilidade química dos compostos.

9 – Depósito de Clínquer: A principal matéria-prima do cimento fica armazenada em silos, aguardando a próxima etapa.

10 – Adições: Junto com o clínquer, adições de gesso, escória de alto forno, pozolona e o próprio calcário compõem os diversos tipos de cimento Portland. Essas substâncias são estocadas separadamente, antes de entrarem no moinho de cimento.

11 – Moagem de Cimento: É na moagem final que o clínquer, adicionado ao gesso ou outras adições, resulta no cimento tal como é conhecido.

12 – Silos de Cimento: O cimento resultante da moagem do clínquer e outras adições é transportado mecânica e pneumaticamente para os silos de cimento, onde é estocado. Após os ensaios finais de qualidade, o produto é enviado para expedição.

13 – Expedição: A remessa do cimento ao mercado consumidor pode ser feita de duas maneiras: a granel ou em sacos de 50Kg. O ensacamento é feito em máquinas especiais, que automaticamente enchem os sacos e os liberam assim que atingem o peso especificado. A embalagem é feita em papel kraft, que garante o perfeito manuseio pelo consumidor.

2.2. TRANSPORTADORES DE CORREIA

2.2.1. INTRODUÇÃO

A ampla difusão dos transportadores de correia é comprovada pela sua presença em praticamente todos os tipos de indústria, além de outros segmentos, como em aeroportos e no comércio. Seu alto desempenho, rapidez, versatilidade de fabricação e economia no transporte de todos os tipos de

carga (materiais ou produtos) são algumas das razões que justificam sua grande aplicabilidade nos mais variados ramos de atividade.

A Norma Brasileira – NBR 6177 define um transportador de correia, abreviadamente “TC” (*belt conveyor* ou “BC”, em inglês), como um “arranjo de componentes mecânicos, elétricos e estruturas metálicas, consistindo em um dispositivo horizontal ou inclinado (ascendente ou descendente) ou em curvas (côncavas ou convexas) ou, ainda, uma combinação de quaisquer destes perfis, destinado à movimentação ou transporte de materiais a granel, através de uma correia contínua com movimento reversível ou não que se desloca sobre os tambores, roletes e/ou mesas de deslizamento, segundo uma trajetória predeterminada pelas condições de projeto, possuindo partes ou regiões características de carregamento e descarga”.

Juntamente com a definição dos transportadores de correia, a Norma NBR 6177 apresenta ainda uma definição para o termo *correia transportadora* (ou *conveyor belt*, em inglês), o qual, é utilizado de maneira errônea como um sinônimo para os transportadores de correia. Segundo a Norma, a correia transportadora é uma “correia contínua (ou sem-fim) destinada a formar a superfície de sustentação sobre a qual será assentado o material a ser transportado. O movimento da correia produz o transporte propriamente dito”. Essa distinção entre os termos se faz importante no presente trabalho, uma vez que as correias transportadoras dos transportadores estudados podem vir a ser um possível objeto de estudo deste relatório. A **Figura 2.4** mostra um exemplo de transportador de correia.



Figura 2.4. Transportador de correia (Arquivo pessoal).

2.2.2. COMPONENTES DE UM TRANSPORTADOR DE CORREIA

Como definido pela Norma NBR 6177, um transportador de correia possui uma série de elementos e componentes que o compõe. Cada componente possui sua devida importância dentro da concepção de projeto de um transportador de correia e seu devido sucesso operacional. Dessa forma, para determinação de uma correia transportadora que se adeque de maneira correta a uma determinada situação de trabalho, é preciso ter o devido conhecimento sobre os componentes do TC, pois estes influenciarão diretamente no esforço sob o qual o transportador de correia pode ser submetido.

A **Figura 2.5** (MERCÚRIO, s/d) ilustra de forma esquemática os componentes de um transportador de correia convencional e suas nomenclaturas. A descrição de cada um é apresentada a seguir.

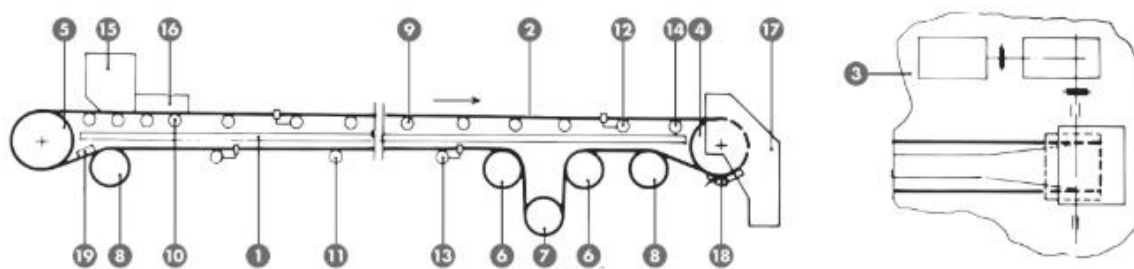


Figura 2.5. Componentes de um transportador de correia (MERCÚRIO, s/d).

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1. Estrutura; | 11. Rolete de retorno |
| 2. Correia transportadora; | 12. Rolete auto-alinhante de carga; |
| 3. Conjunto de acionamento; | 13. Rolete auto-alinhante de retorno; |
| 4. Tambor de acionamento; | 14. Rolete de transição; |
| 5. Tambor de retorno; | 15. Chute de alimentação; |
| 6. Tambor de desvio; | 16. Guias laterais; |
| 7. Tambor de esticamento; | 17. Chute de descarga; |
| 8. Tambor de encosto; | 18. Raspador; |
| 9. Rolete de carga; | 19. Limpador. |
| 10. Rolete de impacto; | |

1. Estrutura

Segundo o Manual Técnico de Correias Transportadoras (MERCÚRIO, s/d), a estrutura de um transportador de correia é composta por elementos responsáveis por promover a sustentação do mesmo. Exemplo disso são os apoios, torres, colunas, treliças, suportes, torres de transferência, entre outros. A

estrutura será o maior elemento mecânico presente, uma vez que todos os demais componentes mecânicos do transportador estarão fixados a ela (CAMPOS, 2013).

2. Correia Transportadora

Segundo Sacramento (2010), a correia é o principal componente de um transportador de correia. Isto se deve ao fato de ser o componente que estará em contato com o material a ser transportado, bem como, por representar o fator preponderante no custo do transportador, correspondendo de 30% a 40% de seu valor. Ainda segundo o autor, alguns critérios são majoritários para se selecionar a correia correta para um transportador. São eles: característica do material transportado, condições de serviço, tipos de roletes, largura da correia, tensão máxima admissível, tempo de percurso e temperatura do material.

A correia é basicamente constituída por duas partes distintas: carcaça e cobertura (ou revestimento). Segundo o Manual Técnico de Correias Transportadoras (MERCÚRIO, s/d), a carcaça é o elemento de força da correia, proporcionando a resistência necessária para a correia suportar a carga, as tensões e flexões, e toda a severidade resultante da movimentação de materiais. A carcaça apresenta duas configurações possíveis, podendo ser de lona ou construída por cabos de aço. A **Figura 2.6** ilustra essas duas configurações. Nas correias transportadoras de lona, esse elemento é constituído basicamente por fibras têxteis, as quais são utilizadas na fabricação dos tecidos que compõe a carcaça. Este tecido é composto por fios denominados urdume e trama, sendo o urdume disposto longitudinalmente e responsável por ser o corpo de força, enquanto a trama efetua sua amarração cruzando-o e provendo-o de resistência transversal. No caso dos cabos de aço, estes possuem diversas formas construtivas, sendo a configuração 7x7, 7 fios com 7 filamentos cada, além de dois tipos de torções: S e Z, as formas mais usuais aplicadas. A depender do nível de solicitação da correia, se terá o tipo e número de lonas (para o caso das correias transportadoras de lona), ou o diâmetro e cabos empregados (no caso das correias transportadoras de cabo de aço) na construção da carcaça.

Em relação a cobertura de uma correia, esse elemento tem como principal função proteger a carcaça contra ataques provenientes do tipo de material transportado. Para isso, o conhecimento acerca das características do material transportado, tais como a granulometria, tipo e quantidade de material, tipo de carga, bem como características operacionais, como velocidade da correia, são essenciais para definir qual o tipo de cobertura será utilizada. Geralmente, as coberturas apresentam graus específicos de resistência a cortes, sulcos, rasgos, abrasão, umidade, temperatura, fogo, ácidos, entre outros. A condição de operação determinará qual destes parâmetros será o mais adequado para seleção da cobertura.



Figura 2.6. Componentes básicos de uma correia transportadora de lona (à esquerda) e de aço (à direita) (MERCÚRIO, s/d).

3. Conjunto de Acionamento

O conjunto de acionamento é responsável por promover o deslocamento da correia e de sua carga. A **Figura 2.7** ilustra este conjunto. Ele é composto pelos seguintes elementos:

- Motor
- Acoplamento (hidráulico para potências superiores a 75hp)
- Redutor de velocidade
- Tambor de acionamento
- Dispositivos de segurança (freio, contra-recuo)

O conjunto gera a movimentação da correia a partir da transmissão de torque, o qual, é transmitido para a correia por meio do atrito desta com o tambor de acionamento. Este tambor encontra-se conectado ao sistema motor-redutor por meio de um acoplamento. A movimentação da correia, por consequência, gera a movimentação de outros componentes do transportador, como os demais tambores listados, bem como dos roletes.

A depender do transportador de correia, o conjunto de acionamento pode estar localizado no retorno, centro do transportador, ou próximo ao terminal de descarga da correia. Para dimensioná-lo, alguns fatores como o espaço disponível para instalação, potência exigida, sentido de movimentação da correia, entre outros devem ser levados em consideração (SACRAMENTO, 2010). Neste contexto, para proporcionar a devida movimentação da correia, alguns fatores característicos de projeto, tais como o ângulo de abraçamento da correia com o tambor de acionamento (α) e o fator de acionamento (K) também não podem ser desconsiderados.

Os dispositivos de segurança citados são destinados a impedir a uma possível descarga continuada de material mesmo após o desligamento do transportados (SACRAMENTO, 2010). Neste contexto, os freios são utilizados em situações emergenciais ou mesmo para controlar a velocidade da correia. Já o contra-recuo são encontrados em transportadores montados em aclives, a fim de evitar um possível retorno de carga caso o equipamento seja desligado.

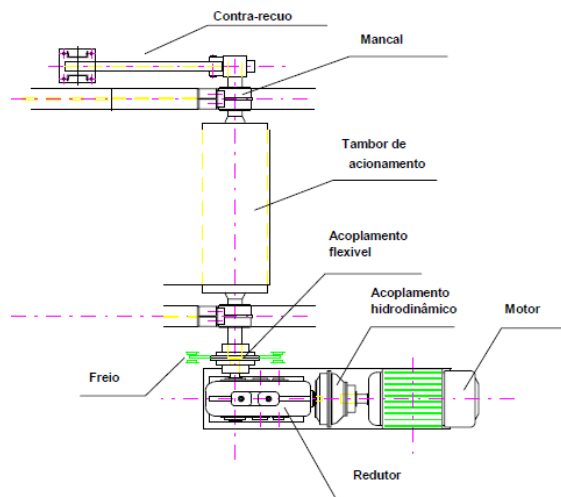


Figura 2.7. Componentes do acionamento (NBR 6177).

4. Tambores

Os tambores são os elementos condutores de um transportador de correia. Estes componentes podem ser encontrados com ou sem revestimento. O revestimento de um tambor de transportador de correia visa garantir um aumento da vida útil, tanto da correia quanto do tambor, além de promover o aumento do coeficiente de atrito entre ambos. Os materiais mais comuns para revestimento de tambores são a borracha natural, SBR (borracha de butadieno estireno), e Neoprene. Os tambores podem ainda ser encontrado lisos, ranhurados ou cerâmicos. Segundo o Manual Técnico de Correias Transportadoras (MERCÚRIO, s/d), a localização e atuação do tambor no transportador garante uma classificação específica a este, a qual, é apresentada a seguir:

- **Tambor de acionamento:** como já dito anteriormente, é utilizado na transmissão do torque gerado a partir da motorização do transportador para a correia, sendo assim considerado o tambor motriz. Em transportadores convencionais, horizontais ou inclinados ascendentes, os tambores de acionamento normalmente se localizam no terminal de descarga do material, enquanto que em transportadores descendentes, ficam próximos ao terminal de alimentação do transportador.
- **Tambor de retorno:** permite que a correia transportadora retorne a sua posição inicial ao promover a mudança de direção e sentido da correia. Também é responsável, na maioria dos casos, por tensioná-la. Localiza-se próximo ao chute de alimentação do transportador de correia, na extremidade oposta ao terminal de descarga.
- **Tambor de desvio:** responsável por promover a mudança de direção de movimento da correia transportadora. Localiza-se geralmente nos sistemas de tensionamento verticais e horizontais automáticos.

- **Tambor de tensionamento:** como o próprio nome sugere, sua função é promover o correto tensionamento da correia, evitando que esta sofra deslizamentos e que tenha bom desempenho durante a operação do equipamento. Localiza-se nos sistemas tensionadores.
- **Tambor de encosto:** possui a função maximizar a área de contato entre correia e o tambor motriz, ao aumentar a área de contato entre ambos, evitando assim deslizamentos e aumentando o efeito da força motriz. Localiza-se no lado inferior do transportador, próximo ao tambor de acionamento.
- **Tambor aletado:** dotado de uma geometria diferente dos demais tambores, possui faces constituídas por aletas radiais (**Figura 2.8**). Sua configuração não permite que o material transportado, ao cair no lado de retorno da correia, seja pressionado contra ela. Isso evita possíveis danos a correia. Pode ser aplicado tanto como tambor de retorno, como também de tensionamento nos tensionadores automáticos verticais.
- **Tambor magnético:** possui a função de separar elementos magnéticos do material transportado. Essa característica pode ser uma bastante útil quando se tem correias projetadas somente para o transporte de materiais britáveis, por exemplo, evitando-se assim que metais entre outros materiais sejam transportados dentro de um processo específico. Localiza-se no terminal de descarga.

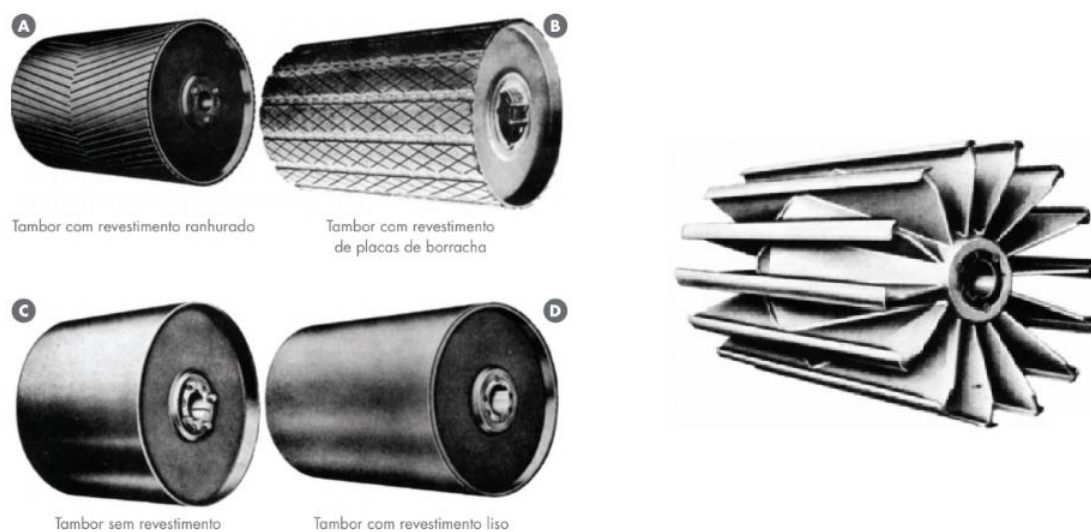


Figura 2.8. Tipos de Tambores (lisos e com revestimento à esquerda, aletado à direita) (MERCÚRIO, s/d).

5. Roletes

Os roletes são um conjunto de um ou mais rolos cilíndricos que se encontram apoiados em suportes apropriados nos quais giram livremente em torno do seu próprio. Eles desempenham a função

de suportar, guiar e conformar a correia transportadora. A depender de sua aplicação, podem ser classificadas de diversas formas (**Figura 2.9**), como descrito a seguir:

- **Rolete de carga:** encontram-se localizados na parte superior do transportador, e desempenham a função de suportar a correia transportadora e a carga que está sendo movimentada sobre ela. Segundo o Manual Técnico de Correias Transportadoras (MERCÚRIO, s/d), sua forma construtiva é baseada em tubos de aço ou ferro fundido, montados sobre um eixo com rolamentos blindados e antifricção. Podem ser encontrados nas seguintes configurações: planos, duplos, triplos, em catenária (composto por 3 ou 5 rolos interligados por articulações ou por rolos espiralados). Ainda de acordo com o manual, os roletes duplos, triplos e em catenária apresentam uma capacidade de carga maior dos que os roletes planos devido ao acamamento que suas configurações proporcionam a correia.
- **Roletes de impacto:** geralmente instalados nas áreas de descarga do material no transportador, desempenham a função de amortecer o choque provocado pelo impacto do material sobre a correia. Dessa forma, evitam-se possíveis rasgos, cortes ou perfurações na correia. Sua forma construtiva é baseada em anéis ou discos de borracha entorno de um tubo de aço, dispostos espaçadamente através de calços. Assim como os roletes de carga, podem ser encontrados nas configurações planas, duplas ou triplas.
- **Roletes de retorno:** encontram-se fixados à estrutura na parte inferior do transportador. São responsáveis por sustentar a correia transportadora em seu retorno. Para sua instalação, deve existir uma folga entre os roletes e a estrutura a fim de permitir uma visualização da correia em seu movimento de retorno. Para evitar possíveis desalinhamentos da correia por conta de materiais que aderem a correia em seu retorno, alterando assim o diâmetro dos roletes em um dos lados, são aplicados aos roletes de retorno anéis ou discos de borracha espaçados simetricamente que ajudam a limpar a correia, minimizando possíveis desgastes de seus componentes. Roletes espiralados com borracha em sua forma construtiva também atuam na limpeza da correia no retorno. Tais roletes também são conhecidos como roletes de limpeza.
- **Roletes auto-alinhantes:** podendo estar dispostos tanto no lado de carga como no retorno, estes roletes tem como função de controlar o deslocamento lateral da correia (SACRAMENTO, 2010). Uma condição para que isso seja feito de forma eficiente é que a correia esteja igualmente apoiada nos rolos do conjunto, ou seja, seu acamamento deve ser o mais correto possível. Segundo o Manual Técnico de Correias Transportadoras (MERCÚRIO, s/d) sua configuração é semelhante aos roletes de carga e retorno, porém podendo ser pivotante e não fixo, além de poder contar com dois braços laterais que atuam no alinhamento ao avançar paralelos à correia em seu sentido contrário de movimento. Ao ocorrer desalinhamento da correia, sua borda tende

a tocar nos roletes verticais, o que provoca um movimento de rotação do conjunto. A acomodação da borda no rolete cria uma força de reação que obriga a correia a procurar seu centro original, reestabelecendo seu alinhamento. Similar aos roletes auto-alinhantes, os rolos guias desempenham função parecida, encontrando-se fixados verticalmente em relação as bordas da correia, e com a função de guiar a correia em caso de deslocamento contra a estrutura (SACRAMENTO, 2010). Estes tipos de roletes devem ser usados em última instância, pois provocam autodestruição das bordas e cisalhamento das lonas da carcaça. Atuar no problema do desalinhamento evita a necessidade do uso de rolos guias.

- **Roletes de transição:** instalados com a finalidade de acompanhar gradativamente a mudança de concavidade da correia quando esta se aproxima dos tambores de acionamento ou retorno. Estes roletes são providos de rolos laterais reguláveis que proporcionam a correia uma mudança gradativa de planos e com equilíbrio de tensões (SACRAMENTO, 2010).

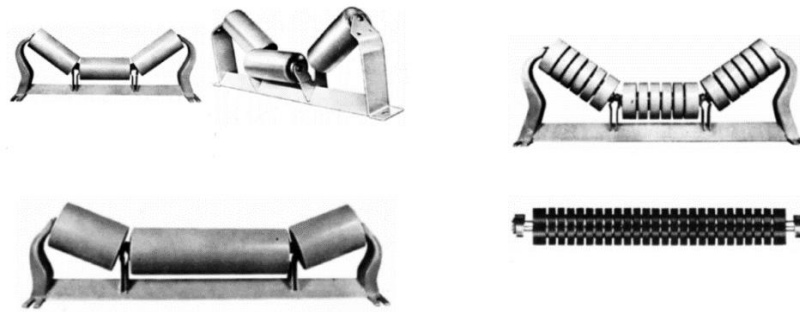


Figura 2.9. Tipos de roletes (roletes triplos convencionais à esquerda, roletes de impacto à direita) (MERCÚRIO, s/d).

6. Chute de alimentação

O chute de alimentação se configura como o elemento do conjunto de alimentação (**Figura 2.10**) de um transportador de correia. Este componente possui formato afunilado e se destina a receber o material transportado e encaminha-lo para a correia transportadora de maneira uniforme e equilibrada, a fim de evitar possíveis transbordamentos de carga. Uma condição ideal de operação é o recebimento do material na mesma direção de movimentação da correia, bem como as velocidades de fluxo de material e da correia serem iguais, o que promove rápida acomodação do material, minimizando desgastes sofridos pela correia neste processo. Este componente localiza-se geralmente próximo ao tambor de retorno.

Para os casos em que a alimentação da correia é feita de maneira transversal ou oblíqua em relação ao sentido de movimentação da correia, tem-se uma condição crítica de operação, uma vez que

alguns componentes do transportador, como o chute, a correia e as guias laterais ficam submetidos ao desgaste devido aos severos impactos do material, que tende a descer de maneira desordenada. Como consequência disso, o impacto do material na correia tende a retardar sua movimentação, agindo de maneira similar a um freio, o que exige um maior esforço mecânico do sistema. A descentralização da carga e o atrito desta com as guias laterais são outras consequências possíveis neste processo. Para a situação descrita, o Manual Técnico de Correias Transportadoras (MERCÚRIO, s/d) recomenda que as guias laterais devem ser mais longas e altas para poderem acomodar o material, evitando que este seja lançado para fora da correia. De acordo com o MERCÚRIO, a largura do chute pode variar entre 50% e 75% da largura da correia, a depender da carga que está sendo transportada.

Para os casos de transporte de materiais abrasivos, os chutes de alimentação devem ser revestidos internamente com placas removíveis de borracha, poliuretano (C824, 2009), placas antidesgaste de CDP (Castodur Diamond Plate) ou outros materiais que possam garantir uma maior vida útil ao chute.

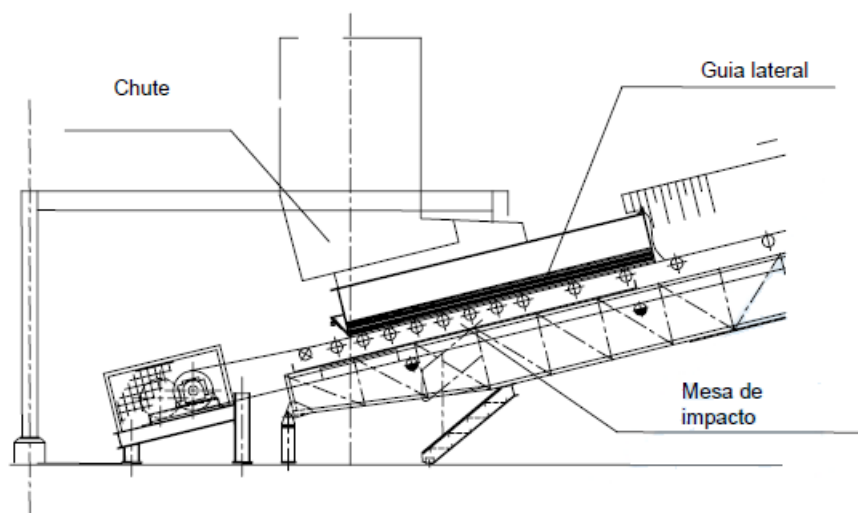


Figura 2.10. Conjunto de alimentação (mesa, guia lateral e chute de alimentação) (NBR 6177).

7. Guias Laterais

Já mencionada anteriormente, as guias laterais tem grande importância no processo de descarga de material em uma correia transportadora pelo chute de alimentação, uma vez que auxilia no fluxo correto do material descarregado sobre a correia ao promover o prolongamento do chute (SACRAMENTO, 2010). O Manual Técnico de Correias Transportadoras (MERCÚRIO, s/d) determina que seu comprimento seja função da velocidade de alimentação da correia. O comprimento das guias laterais não deve exceder ao ponto em que as velocidades do material transportado e da correia se igualem, pois a solitação mecânica seria maior devido ao maior coeficiente de atrito gerado neste processo.

Sua forma construtiva será determinada a partir do tipo de material transportador. Para o caso de materiais de livre vazão, como grãos, pedras e finos, o manual prevê o uso de guias laterais providas de tiras protetoras de borracha.

8. Conjunto de descarga

A realização de descarga de material de um transportador de correia geralmente ocorre por meio do tambor de cabeça ou descarga, projetando o material transportado em algum ponto ou local específico. Os chutes de descargas são os componentes mais comumente aplicados, direcionando o material transportado para silos, ou para outros equipamentos. Os chutes de descarga são dotados das mesmas características descritas anteriormente para os chutes de alimentação.

Para os casos em que a descarga de material é feita em diferentes locais ao longo do percurso do transportador, são utilizados desviadores ou tripers neste processo.

Segundo o Manual Técnico de Correias Transportadoras (MERCÚRIO, s/d), os desviadores são comumente utilizados para o desvio de materiais de baixa granulometria ou de livre vazão, como areia ou grãos. Esses componentes devem ser instalados em correias preferencialmente planas e apoiadas sobre estruturas metálicas. São componentes de construção simples, baixo custo, que devem ficar apoiados, porém sem pressionar a correia. Os desviadores podem ser dos tipos simples, em V (**Figura 2.11**), em V de seção ajustável e móveis.

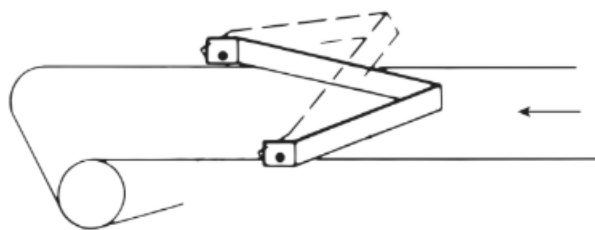


Figura 2.11. Desviador em V (NBR 6177).

Já em relação ao triper (**Figura 2.12**), Sacramento (2010) o define como um equipamento móvel, o qual encontra-se instalado sobre trilhos, e que por isso pode se deslocar ao longo da correia e efetuar a descarga do material em qualquer ponto. Os tipos de tripers utilizados são: manual e motorizado. No sistema manual, manivelas de fácil construção são utilizadas para promover a descarga de material a baixas alturas, enquanto que o sistema motorizado realiza descargas de maior capacidade, e de forma automática.

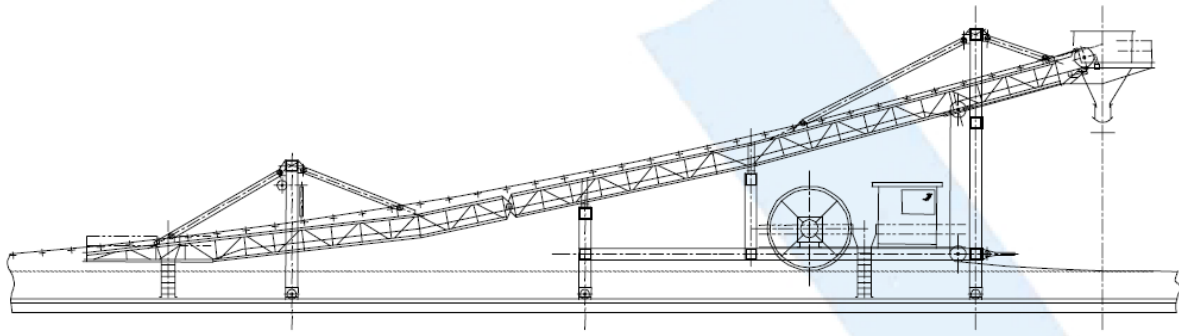


Figura 2.12. *Triper (NBR 6177).*

9. Sistema de Limpeza

O sistema de limpeza de uma correia transportadora tem como função primária garantir a remoção de material transportado restante na correia. Sua atuação é de grande importância para a manutenção da vida útil da correia e de outros componentes do transportador, como tambores e roletes, uma vez que auxilia na remoção de materiais que possam vir a ser prejudiciais para os mesmos, como materiais abrasivos ou dotados de pegajosidade. A queda de material fora de transportadores de correia, ou mesmo ao longo de sua extensão, é um fato recorrente na operação desses equipamentos. A ocorrência de queda de material no retorno da correia, ocasionando o prensamento deste entre a correia e o tambor pode provocar sérios danos a ambos. Raspadores, limpadores e viradores de correia são alguns dos componentes que podem atuar no sistema de limpeza de uma correia.

- **Limpadores:** Os limpadores em formato V (**Figura 2.13**) são aplicados no lado de retorno da correia, geralmente antes do tambor de retorno. Esses componentes consistem de uma estrutura de aço, ou reta com lâmina de borracha adaptada, sendo articulado nas extremidades. Os limpadores agem na correia pela ação do próprio peso (C824, 2009).

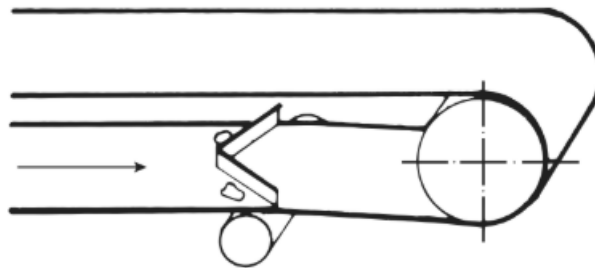


Figura 2.13. *Limpadores em "V" interno (MERCÚRIO, s/d).*

Existem ainda os limpadores de jato d'água, o qual se aplica também no retorno da correia, e a partir da inserção do jato d'água no processo, visa desgrudar as partículas de materiais pegajosos ou abrasivos que estejam aderidos a correia que possam vir a causar danos a ela ou aos demais componentes do transportador (C824, 2009).

- **Raspadores:** Os raspadores são os equipamentos mais aplicados em sistemas de limpeza de transportadores de correia (C824, 2009). Existem dois tipos de raspadores comumente usados:

raspadores de lâmina e raspadores de escovas rotativas. O primeiro, mais aplicado, é constituído de lâminas de borracha, as quais são montadas em suportes e posicionadas na parte inferior do tambor de descarga. A **Figura 2.14** ilustra este tipo de raspador. Seu posicionamento proporciona que o material aderido, mesmo após passar pelo tambor, caia no chute de descarga. Seu acionamento é feito por meio de contrapesos ou molas que proporcionam pressão suficiente da lâmina sobre a correia, removendo assim possíveis resíduos que estejam aderidos a sua superfície (C824, 2009). Estes raspadores podem possuir uma ou mais lâminas ao longo da largura da correia.

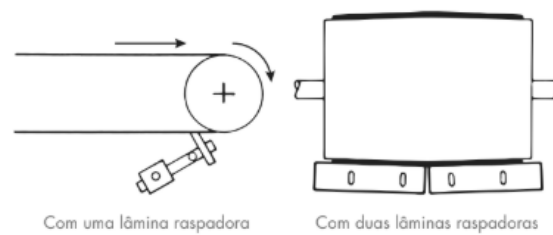


Figura nº 56: Raspadores.

Figura 2.14. Tipos de raspadores (MERCÚRIO, s/d).

Os raspadores rotativos, por sua vez, possuem escovas rotativas com lâminas de borracha. Seu posicionamento é similar ao dos raspadores de lâmina, não permitindo assim que o material retorne pela parte inferior do transportador após passar pela zona de descarga de material. O sistema de acionamento dos raspadores giratórios é motorizado, com as escovas girando em rotação inversa ao sentido da correia.

- Viradores de correia: são geralmente aplicados nos casos em que limpadores e raspadores não conseguem ser eficientes na limpeza da correia. Tambores de giro são utilizados fazendo com que a correia gire em 180° após sua passagem pelo tambor de cabeça, fazendo nova rotação com mesma angulação e sentido oposto próximo ao tambor de retorno. Para aplicação deste componente, deve-se levar em consideração a distância de rotação da correia, a fim de evitar possíveis tensões submetidas em suas bordas (SACRAMENTO, 2010).

10. Componentes adicionais

Além dos componentes já citados, outros podem ser aplicados a um transportador de correia a fim de facilitar a sua utilização e manutenção.

- Esticadores: tem como função garantir a tensão adequada da correia, assim como compensar possíveis mudanças em seu comprimento. Os esticadores mais comuns são: automático por gravidade, o qual utiliza um tambor que recebe força de um contrapeso próximo, e parafuso, o

qual desloca o eixo do tambor por meio de duas roscas ligadas a ele, promovendo o esticamento da correia (SACRAMENTO, 2010).

- Cobertura: pode ser superior ou inferior, sendo a primeira responsável pelo bloqueio da ação da luz do sol e possíveis adversidades climáticas sobre o transportador. Já a cobertura inferior dificulta a passagem de sujeira, resquícios da região superior da correia ou qualquer corpo estranho que procure se depositar sobre a superfície considerada limpa da correia.
- Passadiço: estrutura similar a uma passarela, a qual é construída ao longo do comprimento do transportador, com o objetivo de facilitar ações de manutenção necessárias nos componentes do transportador.

11. Componente de proteção elétrica

Para efeito do estudo realizado no presente relatório, a breve citação de alguns dos componentes elétricos que compõe um transportador de correia se faz necessária. Dentre eles tem-se: chave de emergência, detector de baixa velocidade, detector de rasgos, detector de metais, extrator de sucatas, detector de desalinhamento da correia e sensor de entupimento de chute.

2.2.3. MECANISMOS DE FALHA EM TRANSPORTADORES DE CORREIA

Durante sua operação, os transportadores de correia podem sofrer desvios operacionais, e mesmo ter sua operação interrompida, devido a ocorrência de falhas em seus componentes. O perfil dessas falhas pode ser do ponto de vista mecânico, elétrico ou mesmo devido a características do processo que levem o equipamento a não operar de maneira correta.

Na **Tabela 2.1** apresentam-se alguns dos modos de falha em transportadores de correia.

Tabela 2.1. Modos de falhas de correias transportadoras (Diniz, Hélio & Coelho Dutra, Douglas & Oliveira, Nicolas & Gonçalves Braga, Gilberto & José Pacheco Pujatti, Fabrício, 2015).

Componentes	Falha Funcional	Modo de Falha
Acionamento	Acionar o transportador de correia com velocidade pré-determinada	Motor elétrico queimado
		Motor elétrico sem energia
		Motor elétrico sobrecarregado
		Redutor com vibração por desalinhamento com motor elétrico
		Redutor com elementos de máquinas danificados
	Fazer o atrito e contato entre o tambor de acionamento e a correia transportadora	Revestimento do tambor solto ou desgastado
Raspador	Não limpa a correia	Danos nos mancais de rolamento
		Lâmina desgastada ou danificada
Tensionador de correia	Não tensiona a correia	Suporte do raspador danificado
Correia Transportadora	Não conduz o material transportado do chute de alimentação até o chute de descarga	Danos nos tambores e nos carros tensionadores
		Cavaletes e roletes danificados por quedas de material
		Correia rasgada
		Correia travada por material com excesso de umidade
Estrutura	Não sustenta o transportador	Correia desalinhada
Chutes de alimentação	Não recebe e alimenta a correia com minério proveniente de outro equipamento	Danos na estrutura metálica treliçada por corrosão
		Danos ao chute e seus acessórios de vedação

Em vista de se garantir uma operação bem-sucedida dos transportadores de correia, minimizando a ocorrência dos modos de falhas apresentados na **Tabela 2.1**, análises de engenharia baseadas em conceitos de Confiabilidade tornam-se essenciais para a garantir o desempenho da função requerida destes equipamentos dentro do processo produtivo.

2.3. FUNDAMENTOS DA ANÁLISE EM CONFIABILIDADE

2.3.1. CONCEITO DE CONFIABILIDADE

A definição de Confiabilidade se estabeleceu em um contexto da economia globalizada em que o aumento na demanda por produtos e sistemas de melhor desempenho, com custos competitivos, se tornou algo intrínseco do sucesso de qualquer empresa no mercado. Dessa forma, a ocorrência de falhas no processo que representem um aumento nos custos associados aos produtos, ou mesmo falhas que impliquem em riscos à segurança de uma maneira geral (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011) passaram a ser analisadas visando-se reduzir a sua probabilidade de ocorrência. Este processo conseqüentemente gera um aumento da confiabilidade, contribuindo para a construção de conhecimento técnico e formal que tem como objetivo minimizar a ocorrência e possível reincidência de falhas em produtos e seus processos.

A Confiabilidade pode ser definida, de maneira simples, como a operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Esta definição, no entanto, pode ser melhor traduzida em termos quantitativos, tendo como base uma análise de engenharia fundamentada em termos de probabilidade. A definição proposta por Leemis (1995) e utilizada por Fogliatto e Ribeiro (2011) define a confiabilidade como item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas.

Da definição apresentada, observam-se quatro elementos que são fundamentais para a devida compreensão da Confiabilidade (HALPERN, 1978). Eles aparecem descritas em detalhes conforme segue:

1. **Probabilidade:** Confiabilidade é definida, portanto, como uma probabilidade. Isto implica que ela pode ser mensurável (computável, testável e verificável) (VACCARO, 1997). Tem-se, dessa forma, uma grande quantidade de ferramentas estatísticas e matemáticas que podem ser utilizadas para auxiliar na descrição quantitativa dos parâmetros que se desejam caracterizar através de sua análise de Confiabilidade.
2. **Desempenho adequado (“propósito”, “desempenhar adequadamente”):** o correto entendimento do que vem a ser um desempenho adequado por parte do item (produto ou processo) é importante para se definir o melhor modelo matemático que se aplica a tal por meio da análise de Confiabilidade. Dessa forma, um produto pode ser considerado com um desempenho adequado se, ao longo de determinado tempo de operação, consegue desempenhar a função para a qual foi designado. A perda da capacidade de cumprir com suas funções se configura como uma falha, o que indica pela perda de Confiabilidade do item.

3. **Tempo de operação (“período de tempo”):** A Confiabilidade é definida como função de um período de tempo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Essa dependência no tempo indica que cada item possui um tempo de vida finito, e a previsão deste tempo para desempenhar uma determinada função por parte do item pode ser realizada por meio da análise de Confiabilidade. Tal característica pode ser interessante, por exemplo, no dimensionamento de garantias dos produtos por parte das empresas (VACCARO, 1997).
4. **Condições operacionais (“condições ambientais”):** Segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), um item pode apresentar desempenhos operacionais distintos de acordo com o ambiente onde está inserido. Com isso, a avaliação de Confiabilidade de um item deve levar em consideração as condições em que este opera, a fim de precisar corretamente a sua confiabilidade.

A Confiabilidade e seu devido entendimento se fazem de grande importância nas aplicações feitas com base na sua conceituação. Outro ramo de grande relevância na área das Ciências Estatísticas, como a Análise de Sobrevivência, fundamenta-se em definições semelhantes e possui interpretações próprias para a Confiabilidade, generalizando a aplicação desta ferramenta a diversas outras áreas do conhecimento nas quais o tempo é variável de resposta analisadas (VACCARI, 1997). Entretanto, as interpretações tratadas no presente estudo serão pertinentes a Engenharia e suas ciências.

2.3.2. MEDIDAS DE CONFIABILIDADE

As medidas mais utilizadas em uma análise de Confiabilidade são: função densidade de falhas $f(t)$, função acumulada de falhas $F(t)$, função Confiabilidade $R(t)$ e função de risco $h(t)$ e o MTBF – *Tempo Médio entre Falhas* (do inglês *Mean Time Between Failures*). As expressões que se seguem são apresentadas em Fogliatto e Ribeiro (2011).

1. Funções Densidade de Falhas e Distribuição Acumulada de Falhas

O tempo até a falha de um produto é definido como o período de tempo no qual o mesmo é colocado em operação até que ocorra sua primeira falha, ou seja, este deixe de desempenhar sua função requerida. Dessa forma, sabe-se em Confiabilidade, que este período de tempo nem sempre é medido de maneira contínua, podendo assumir valores discretos, como número de ciclos até a falha (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Neste contexto, define-se uma variável aleatória T como medida do tempo até a falha, uma vez que este tempo está sujeito a variações aleatórias. A função de densidade de falha $f(t)$ e a função acumulada de falha (ou Distribuição Acumulada de Falhas) $F(t)$ são apresentadas e definidas na sequência:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u)du, t > 0 \quad (2.1)$$

$$f(t) = F'(t) = \frac{d}{dt}F(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (2.2)$$

A função de densidade de falha $f(t)$ representa a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo, enquanto que a função acumulada de falha $F(t)$ calcula a probabilidade de falha dentro de um intervalo de tempo especificado $t < T$ (SANTOS, 2017). Para valores pequenos de Δt , a aproximação a seguir pode ser aplicada:

$$P(t < T \leq t + \Delta t) \approx f(t) \cdot \Delta t \quad (2.3)$$

2. Função Confiabilidade, $R(t)$

A definição da função de Confiabilidade $R(t)$ remete, de maneira ampla, a probabilidade acumulada de sucesso de uma unidade. Devido a isso, ela também pode ser denominada como função de sobrevivência (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Para isso, supõe-se um ambiente operacional previamente definido em que está inserida uma amostra composta por n_0 unidades idênticas, as quais, são submetidas a testes. Após um determinado período de testes t , observa-se que $n_f(t)$ unidades do total n_0 falharam, enquanto que as demais, $n_s(t)$, sobreviveram. Dessa forma, no ambiente estudado e dentro do período estabelecido t , a função de confiabilidade $R(t)$ é:

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_0}, t > 0 \quad (2.4)$$

Ao considerar o fato de que a soma das unidades sobreviventes e que falharam será sempre uma constante, é possível reescrever a expressão da seguinte forma:

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_0} = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} = \frac{n_s(t) + n_f(t) - n_f(t)}{n_s(t) + n_f(t)} = 1 - \frac{n_f(t)}{n_s(t) + n_f(t)} = 1 - \frac{n_f(t)}{n_0}, t \geq 0 \quad (2.5)$$

Da expressão anterior, o percentual acumulado de eventos, neste caso de falhas, representa a função de acumulada de falhas $F(t)$ (VACCARO, 1997). Dessa forma, é possível definir que a função de distribuição $F(t)$ é o complemento da função de Confiabilidade $R(t)$, podendo assim ser apresentada conforme segue:

$$R(t) = 1 - F(t), t \geq 0 \quad (2.6)$$

Ou ainda, da **Eq. 2.1**, tem-se que:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u) du = \int_t^{+\infty} f(u) du \quad (2.7)$$

3. Função de Risco, $h(t)$

A função de risco $h(t)$, também denominada em Confiabilidade como taxa de falha instantânea, pode ser interpretada como a quantidade de risco que está associada a uma unidade no tempo t (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Ou seja, ela indica o percentual de probabilidade de falhas em relação a confiabilidade de uma unidade em cada instante medido. Se em um determinado instante a probabilidade de falha de uma unidade é pequena, mas sua Confiabilidade atingiu níveis baixos, como resultado se terá um risco de falha bastante considerável (VACCARO, 1997). Dessa forma, entende-se a grande importância que esta função possui para engenheiros de projeto e sistema, além de grupos das áreas de reparo e manutenção, pois por meio desta torna-se possível definir período entre falhas, políticas de manutenção, disponibilidade de equipamentos e custos associados a possíveis garantias (ELSAYED, 1996).

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), a função de risco pode ser derivada usando-se probabilidade condicional. Assim, considerando a probabilidade de falha em um período de t até $t + \Delta t$:

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} f(u)du = R(t) - R(t + \Delta t) \quad (2.8)$$

Para a unidade operando em um tempo t , obtém-se a seguinte expressão:

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t | T \geq t) = \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t)}{P(T \geq t)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (2.9)$$

Supondo $\Delta t \rightarrow 0$, obtém-se a taxa de falha de risco (instantânea), que representa a função de risco, dada por:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} = \frac{-R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (2.10)$$

A função de risco deve satisfazer as seguintes condições:

$$(i) \int_0^{+\infty} h(t)dt = +\infty \quad (2.11)$$

$$(ii) h(t) \geq 0, \forall t \geq 0 \quad (2.12)$$

A unidade de medida da função $h(t)$ é dada em termos de falhas por unidade de tempo.

A partir da função de risco $h(t)$, pode-se ainda determinar a função acumulada de risco $H(t)$ ao integrá-la:

$$H(t) = \int_0^t h(u)du, t \geq 0 \quad (2.13)$$

Esta função traz uma representação alternativa da função de risco, se assemelhando na forma, independente da distribuição que modela os tempos até a falha (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

4. Tempo Médio entre Falhas, MTBF

Uma das medidas estatísticas mais importantes dentro do contexto de mensuração da confiabilidade de um produto é o MTBF (do inglês *mean time between failures*, ou tempo médio entre falhas). Como o próprio nome sugere, essa medida calcula o tempo médio até a falha das unidades, sendo aplicada a produtos que não podem ser reparados (VACCARO, 1997).

Para estimar um MTBF a partir da média dos tempos, supõem-se novamente um conjunto de n_0 unidades que tem duração até a i -ésima unidade de tempo t_i . Dessa forma, a expressão para o MTBF é apresentada como:

$$MTBF = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} t_i \quad (2.14)$$

Dada uma variável aleatória T associada aos tempos de falha das unidades, o MTBF pode ser dado pela Esperança Matemática (ou expectância, ou seja, valor esperado) de T (VACCARO, 1997):

$$MTBF = E(T) = \int_0^{+\infty} t \cdot f(t)dt \quad (2.15)$$

Da Eq .2.2, entende-se que $f(t) = -R'(t)$, pode-se reescrever a expressão para o MTBF como sendo:

$$MTBF = - \int_0^{+\infty} t \cdot \frac{dR}{dt}(t)dt = - \int_0^{+\infty} t \cdot dR(t) \quad (2.16)$$

Integrando-se por partes a expressão acima, tem-se:

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R(t)dt \quad (2.17)$$

Este resultado demonstra então o MTBF de um sistema a sua Confiabilidade.

2.3.3. DISTRIBUIÇÕES DE PROPABILIDADE

Como apresentado em sua definição, a Confiabilidade de uma unidade, que pode vir a ser um componente ou sistema, é dada por sua probabilidade de sobrevivência até um determinado tempo t (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Para tornar esta estimativa possível, se faz necessário modelar os tempos até a falha da unidade estudada. Os modelos matemáticos, em geral, são aplicados para descrever o comportamento da unidade com detalhamento e tendo como auxílio algum tipo de formulação matemática (VACCARO, 1997). No estudo aplicado à Confiabilidade, as formulações se baseiam em funções matemáticas e distribuições probabilísticas (SPINGARN, 1986a).

As distribuições de probabilidade são utilizadas de maneira a promover o ajuste aos dados de sobrevivência do sistema até o tempo desejado. Assim, o uso de distribuições probabilísticas aplicado a um conjunto de dados coletados permite prever comportamentos, os demonstrando por meio de parâmetros característicos da confiabilidade e dentro de intervalos de confiança estatísticos.

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), as quatro distribuições comumente utilizadas em estudos de Confiabilidade, tornando-as de maior interesse no presente relatório, são: Exponencial, *Weibull*, Gama e Lognormal. As formulações das distribuições citadas serão apresentadas conforme segue.

1. Distribuição Exponencial

Para o caso de estudos de Confiabilidade de sistemas e componentes que tendem a apresentar taxas de risco constantes ao longo da sua vida útil, a distribuição Exponencial se faz a mais adequada, visto que é a única distribuição contínua com função de risco constante. Componentes eletrônicos, como capacitores, transistores, resistores e circuitos integrados se enquadram bem neste contexto.

A descrição matemática da função de risco derivada da distribuição Exponencial é apresentada a seguir:

$$h(t) = \begin{cases} \lambda & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

A partir dessa expressão, se deduz as demais medidas de Confiabilidade resultantes dessa distribuição:

$$R(t) = \begin{cases} e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 1 & t < 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$f(t) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.21)$$

É possível perceber que, para um intervalo de tempo $t \geq 0$, a taxa de falhas é constante, sendo $\lambda \in \mathbb{R}^+$. Para o cálculo do MTBF, substitui-se a **Eq. 2.19** em **Eq. 2.17** obtendo-se:

$$MTBF = \int_0^{+\infty} e^{-\lambda t} \cdot dt = -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^{+\infty} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.22)$$

Logo,

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.23)$$

Algumas representações de confiabilidade da distribuição Exponencial podem ser visualizadas a partir dos gráficos da **Figura 2.15**.

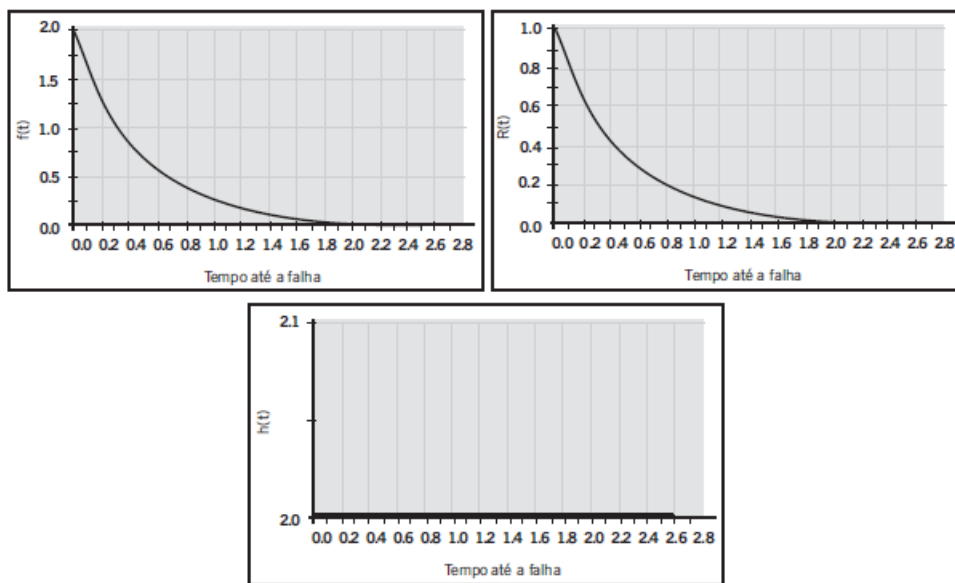


Figura 2.15 – Representações da distribuição exponencial (Fogliatto e Ribeiro, 2011).

2. Distribuição de Weibull

A distribuição de *Weibull* é uma das mais importantes distribuições em modelos de Confiabilidade devido a flexibilidade e à capacidade de representação de amostras de tempos até a falha com comportamentos distintos (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Essa distribuição também é bastante usada em pequenas amostras, sendo considerada um bom ponto de partida na análise.

Na modelagem de tempos até falhas apresentando funções de risco não lineares ao longo do tempo, Elsayed (1996) recomenda o uso deste modelo. Fogliatto e Ribeiro (2011) vai na mesma linha, destacando a distribuição de *Weibull* como apropriada na modelagem dos tempos que apresentam funções de risco constante, levemente crescente e levemente decrescente. Essa capacidade de representar comportamentos monotônicos para a função de risco justifica a distribuição de *Weibull* ser a mais amplamente empregado em análises de Confiabilidade (VACCARO, 1997).

A função de risco $h(t)$ para o modelo de *Weibull* para $t \geq 0, \gamma \geq 0$ e $\theta \geq 0$, sendo γ e θ os parâmetros de forma e escala da distribuição, é descrita como:

$$h(t) = \begin{cases} \frac{\gamma}{\theta} \cdot \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

A dedução das demais representações de confiabilidade da distribuição *Weibull* a partir da **Eq. 2.24** são fornecidas nas seguintes equações:

$$R(t) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} & t \geq 0 \\ 1 & t < 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\gamma}{\theta} \cdot t^{\gamma-1} \cdot e^{-t^\gamma/\theta} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

Para o cálculo do MTBF, novamente, a partir da **Eq. 2.17**, substituindo **Eq. 2.25** na expressão da função de Confiabilidade $R(t)$, tem-se:

$$MTBF = \theta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (2.28)$$

em que Γ representa a função matemática Gamma.

A distribuição de *Weibull* apresenta comportamentos distintos a depender dos valores assumidos pelo parâmetro de forma γ . Observa-se tal versatilidade:

- Para $\gamma < 1$, a função taxa de falha (função de risco) do modelo torna-se decrescente. Na prática, isso pode ser observado, por exemplo, nas fases de vida iniciais de vários componentes mecânicos e elétricos (VACCARO, 1997).
- Para $\gamma = 1$, a função taxa de falha torna-se constante, transformando-se na distribuição Exponencial. Dessa forma, pode-se concluir que a distribuição de *Weibull* é um caso mais geral dessa distribuição (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).
- Para $\gamma \geq 1$, tem-se uma função taxa de falha crescente, própria para representação de componentes que já atingiram a fase final de sua vida (VACCARO, 1997).

As diferenças de comportamento da função taxa de falha (ou função de risco) $h(t)$ citadas anteriormente podem ser representadas nos gráficos da **Figura 2.16**.

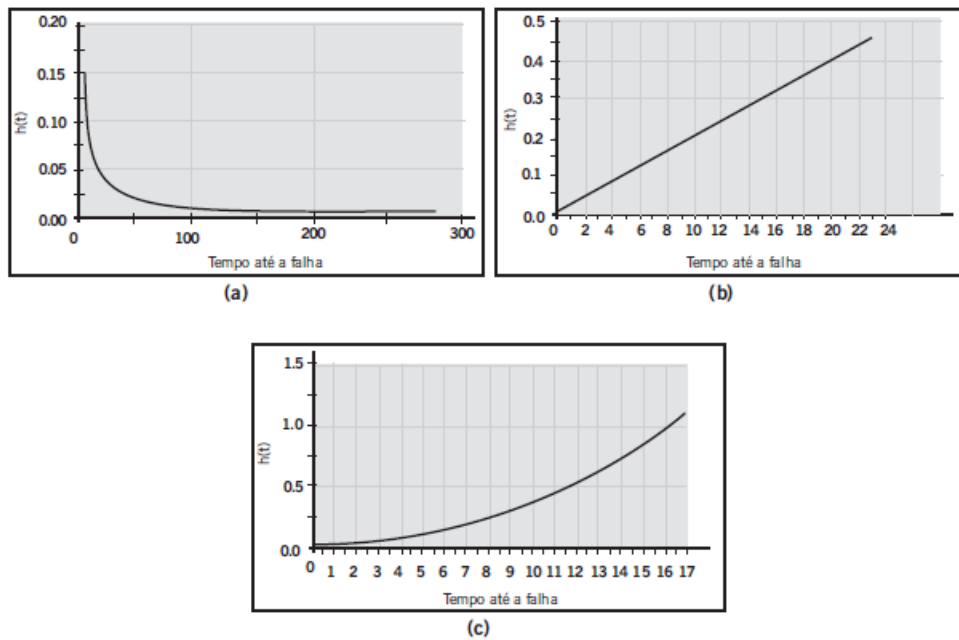


Figura 2.16. Função de risco para (a) $\gamma = 0,5$; (b) $\gamma = 2,0$; (c) $\gamma = 3,6$ (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

3. Distribuição Gama

O modelo de distribuição gama, assim como a distribuição *Weibull*, se configura como um caso mais geral da distribuição Exponencial (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Apesar de utilizado em modelagens de Confiabilidade, a distribuição Gama costuma não ser a mais indicada para esses casos devido a sua taxa de risco torná-la inapropriada para a maioria dos produtos, pois os valores assumidos pelo parâmetro de forma γ e pelo parâmetro de escala λ do modelo podem alterar sua forma, dificultando o ajuste ao conjunto de dados associado a unidade (VACCARO, 1997; NELSON, 1982). Apesar dessa dificuldade, o modelo pode ser usado para o ajuste de dados de tempos até falhas de sistemas em que as falhas estão associadas a um conjunto de sub-falhas com taxa de ocorrência constante (ELSAYED, 1996). A fim de demonstrar esta situação, considere uma unidade a qual sofre sucessivos choques. Os intervalos de tempo T_1, T_2, \dots, T_n entre os choques consecutivos são independentes e exponencialmente distribuídos, com parâmetros λ . Dessa forma, se a unidade falhar no n -ésimo choque, seu tempo até a ocorrência da falha é será $T = T_1 + T_2 + \dots + T_n$. T segue uma distribuição gama (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

A função densidade de falha para a distribuição Gama, para $t \geq 0, \gamma > 0$ e $\lambda > 0$, é dada por:

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\gamma)} \cdot (\lambda t)^{\gamma-1} \cdot e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (2.29)$$

em que Γ é a função matemática Gama. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), os formatos assumidos pela função densidade da distribuição Gama são similares aos da distribuição *Weibull*, o que torna difícil diferenciar os dois modelos por meio dos gráficos de densidade.

As demais medidas de Confiabilidade da distribuição Gama são:

$$F(t) = \frac{\lambda^\gamma}{\Gamma(\gamma)} \cdot \int_0^t x^{\gamma-1} \cdot e^{-\lambda \cdot x} dx \quad (2.30)$$

$$F(t) = \frac{\lambda^\gamma}{\Gamma(\gamma)} \cdot \int_0^t x^{\gamma-1} \cdot e^{-\lambda \cdot x} dx \quad (2.31)$$

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \cdot \int_0^{\lambda t} x^{\gamma-1} \cdot e^{-x} dx \quad (2.32)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.33)$$

Para a função de risco da distribuição Gama, de maneira análoga a distribuição de *Weibull*, tem-se:

- Para $\gamma < 1$, a taxa de falhas é decrescente de $+\infty$ até λ .
- Para $\gamma = 1$, a taxa de falha mantém-se constante e igual a λ .
- Para $\gamma > 1$, a taxa de falhas é crescente de λ até $+\infty$, para t indo de 0 até $+\infty$.

Para a medida do MTBF da distribuição Gama, tem-se que:

$$MTBF = \frac{\gamma}{\lambda} \quad (2.34)$$

sendo $\gamma > 0$ e $\lambda > 0$.

4. Distribuição Lognormal

A distribuição Lognormal é muito utilizada para ajuste de dados por apresentar uma grande quantidade de formatos, de acordo com seus parâmetros. Este modelo é particularmente indicado em dados com intervalo de variação em que existem várias ordens de grandeza (VACCARO, 1997). Exemplos possíveis de dados de Confiabilidade em Engenharia que seguem essa distribuição são os casos de fadiga metálica, vida de isolamentos elétricos e tempos de reparos de certos equipamentos. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), o tempo até a falha de uma unidade seguirá um modelo Lognormal se $Y = \ln T$ for normalmente distribuído. A Lognormal, ainda segundo o autor, é uma distribuição limitada a esquerda. Isso faz com este modelo seja muito utilizado na modelagem de tempos até reparo em unidades reparáveis. Sendo assim, é razoável concluir que a probabilidade de concluir um reparo aumenta com o tempo. A demora do reparo, em muitos casos, pode ser um indicativo de alguns fatores, tais como desconhecimento técnico por parte dos mecânicos na execução da atividade, ou mesmo falta de matéria-prima necessária para a conclusão do reparo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

A função de densidade da distribuição Lognormal para $t \geq 0$ é:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(\ln(t) - \mu)}{\sigma}\right]^2\right\} \quad (2.35)$$

A função de distribuição acumulada de falhas é dada por:

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} \cdot \int_0^t \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right)^2}}{x} dx \quad (2.36)$$

em que $\Phi(x)$ é o valor da função de distribuição normal padronizada.

As demais medidas de Confiabilidade de interessa da distribuição Lognormal são dadas por:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{\mu - \ln(t)}{\sigma}\right) \quad (2.37)$$

$$h(t) = \frac{\phi[(\mu - \ln(t))/\sigma]/\sigma t}{\Phi[(\mu - \ln(t))/\sigma]} \quad (2.38)$$

em que $\phi(x)$ é o valor da função de densidade da distribuição normal padronizada.

A representação gráfica da função de risco $h(t)$ pode ser vista na **Figura 2.17**. Percebe-se que seu formato sugere uma função de risco inicialmente crescente, e após, decresce assintoticamente.

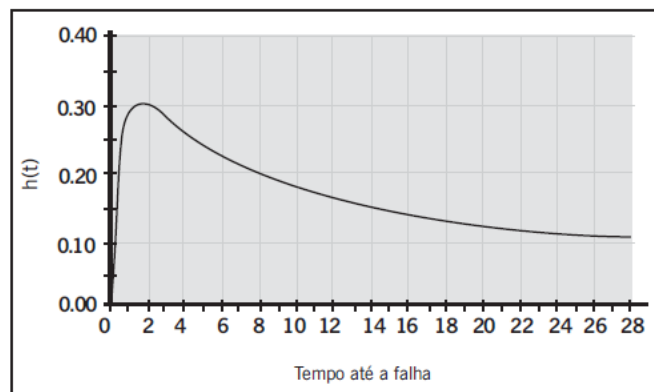


Figura 2.17. Função de risco da Lognormal para $\mu=1$ e $\sigma=0,5$ (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

A medida de MTBF da distribuição de Lognormal é dada por:

$$MTBF = e^{(\mu - \sigma^2)/2} \quad (2.39)$$

2.3.4. TAXAS DE FALHAS, FASES DE VIDA E ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO

Uma unidade, que pode vir a ser um equipamento ou componente, pode seguir três comportamentos distintos ao longo da sua vida útil (HALPERN, 1978). Esses comportamentos ocorrem em períodos característicos da vida desta unidade, denominados a seguir segundo Sellitto (2005):

1. Período de Mortalidade Infantil.
2. Período de Maturidade (ou também conhecida como *Período de Vida Útil*)
3. Período de Mortalidade Senil.

Tais períodos são assumidos a partir de classificações derivadas das variações da função de risco ao longo do tempo. Eles podem ser analisados pela conhecida curva da banheira, a qual, representa graficamente a função de risco $h(t)$ ao longo do ciclo de vida (SANTOS, 2017). Na **Figura 2.18** é apresentada a curva da banheira de um equipamento ou componente.

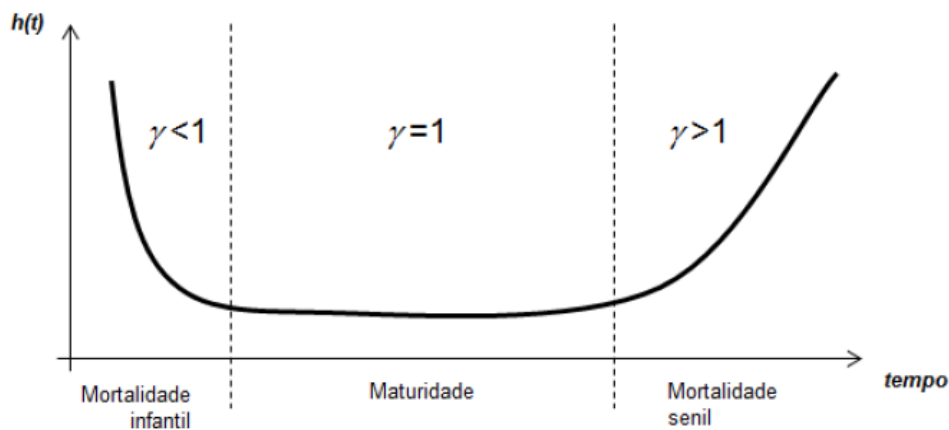


Figura 2.18. Curva da banheira (adaptado LAFRAIA, 2001; SELLITTO, 2005).

A partir da curva da banheira apresentada no gráfico da **Figura 2.18** é possível perceber a relação de cada fase da curva a um comportamento específico da função de risco $h(t)$. Esta relação foi estabelecida através do fator de forma γ da distribuição *Weibull*, a qual serve com o propósito de modelar a função de confiabilidade do equipamento (SELLITTO, 2005). A partir dessa associação feita, é possível assim desenvolver um planejamento da manutenção desses equipamentos de maneira mais adequada, com apoio da análise de Confiabilidade.

No período inicial, descrito como Mortalidade Infantil, tem-se uma probabilidade alta de ocorrência de falhas devido aos altos valores da função de risco $h(t)$. Este fato deve-se a defeitos prematuros, os quais são originados dos próprios processos de fabricação dos produtos e que não são detectados nos testes de qualidade, vindo a provocar posteriores falhas. Outros fatores, como instalação incorreta do equipamento ou materiais fora de especificação também podem motivar essas falhas

(LAFRAIA, 2001). Apesar de apresentar taxas de falhas inicialmente altas, observa-se, porém, que estas decrescem ao longo do tempo, como pode ser visto na curva da banheira.

O período que se segue, descrito como Maturidade ou Vida Útil, se aplica aos “sobreviventes” da fase inicial, e é marcado por taxa de falhas menor e que oscila ao redor de uma média constante (SELLITTO, 2005). Neste período, falhas causais são as mais esperadas, tendo componentes sobreviventes em boas condições de trabalho e ainda distantes de possíveis falhas por desgaste (VACCARO, 1997). Mau uso do equipamento, fenômenos naturais imprevisíveis ou mesmo operação superando limites de resistência do equipamento também podem ser citadas como possíveis falhas casuais que podem vir a ocorrer neste período (SANTOS, 2017). Para esta fase da vida do equipamento, a estratégia recomendada para a manutenção é a aplicação de técnicas de manutenção preditiva, feitas conforme for necessário e dentro de uma periodicidade definida.

No último período, descrito como Mortalidade Senil, tem-se uma fase caracterizada por sinais visíveis de desgaste. Percebe-se neste período que a taxa de falhas é crescente, tendendo a aumentar à medida que o equipamento se aproxima do seu fim de vida útil. Dessa forma não é mais possível associar as falhas ocorridas neste momento a eventos casuais, mas sim à fadiga dos componentes (VACCARO, 1997). Degradação mecânica, elétrica ou química, corrosão, ou vida de projeto curta são outros fatores possíveis (SANTOS, 2017). Para esta fase, a melhor estratégia para a manutenção é a manutenção preventiva dos equipamentos, promovendo a troca de componentes antes que venham a falhar de maneira inevitável (SELLITTO, 2005).

Uma observação importante a ser feita em relação a esta última fase se baseia no fato de que, para o caso de componentes elétricos e eletrônicos, o período de mortalidade senil não se define da mesma forma que para componentes mecânicos. Para tais componentes, esta fase apresenta uma taxa de falha que tende a aumentar de forma lenta e linear (RIBEIRO, 1995), diferentemente da apresentada na **Figura 2.18**, característica de componentes mecânicos. Dessa forma, existe uma clara distinção entre os componentes citados. A **Figura 2.19** ilustra esta diferença.

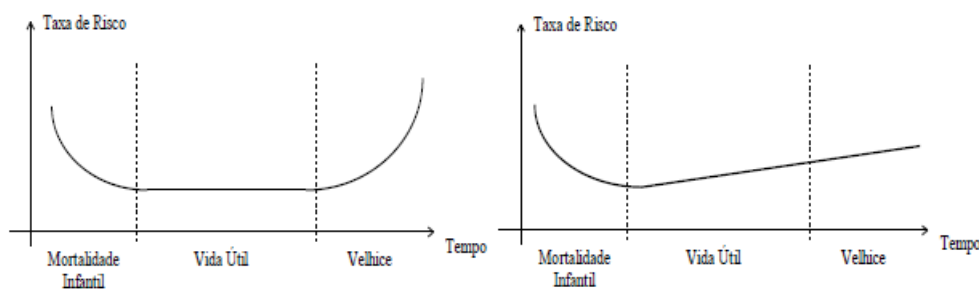


Figura 2.19. *Curvas da banheira para componentes mecânicos (à esquerda) e elétricos (à direita) (RIBEIRO, 1995).*

2.3.5. MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO E ADEQUAÇÃO DE AJUSTE

O processo de estimação de um modelo probabilístico para dados de uma falha é caracterizado pela escolha de uma distribuição apropriada para a descrição do conjunto amostral e pela estimação dos parâmetros da distribuição escolhida (VACCARO, 1997). Para isso, segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), existem duas formas de se verificar/testar o ajuste de dados a distribuições hipotetizadas que irão modelar um determinado conjunto de dados:

- Método Gráfico (também conhecido como *Método Empírico*), por meio de histogramas de frequência e papéis de probabilidade.
- Método Analítico, por meio dos testes de aderência.

O método Gráfico, também denominado de método empírico, se dá a partir da visualização e identificação de formas que aparentemente se adequam melhor na modelagem de um conjunto de dados. Um exemplo prático dessa situação é a hipótese inicial de que uma determinada distribuição de probabilidade se adapta mais adequadamente a um determinado conjunto de dados por meio da análise empírica de histogramas de frequência e risco, obtidos a partir dos dados disponíveis (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Para verificar se a hipótese inicial é válida, se compara a distribuição adotada com uma tabela de distribuições conhecidas. Uma vez confirmada a semelhança, a análise feita pode ser refinada de por meio da análise gráfica dos Papéis de Probabilidade da distribuição escolhida (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

Os Papéis de Probabilidade são recursos gráficos utilizados na verificação da qualidade do ajuste de uma distribuição (VACCARO, 1997). Nesta etapa, os dados são transformados, se distribuindo como pontos em torno de uma reta que tende a representar a função Distribuição Acumulada de Probabilidade. Ou seja, a reta reflete o comportamento esperado com base em uma distribuição específica. Quanto mais próximos estes dados estiverem da reta-base que representa a distribuição, melhor será o seu ajuste ao modelo considerado (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Nota-se, portanto, que haverá um Papel de Probabilidade próprio para cada distribuição (VACCARO, 1997).

Já em relação ao método analítico, este é geralmente preferido na análise dos ajustes de uma determinada distribuição a um conjunto de dados amostrais (VACCARO, 1997) quando comparado ao método gráfico. A aplicação desse método se dá por meio da realização dos chamados *testes de aderência*, sendo o teste do qui-quadrado (χ^2) e o de Kolmogorov-Smirnov (K-S) os mais conhecidos. Ambas se baseiam na estrutura de um teste de hipóteses, na qual uma determinada hipótese nula (H_0) segue uma determinada distribuição (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

O teste do qui-quadrado (χ^2) é um teste paramétrico bastante popular e se baseia na estimação de diferenças existentes entre as frequências esperadas e as observadas em intervalos específicos (VACCARO, 1997). Ainda segundo Vaccaro (1997), as hipóteses envolvidas deste teste são a de independência entre repetições das ocorrências que dão origem aos dados e a de nulidade. Para a realização do teste, primeiramente formula-se a hipótese que será testada. Assumir que uma Função de

Distribuição Acumulada de uma determinada distribuição de probabilidade se ajusta ao conjunto de dados costuma ser a hipótese assumida. Dessa forma, esta será a hipótese nula (H_0) considerada. Ao calcular a soma dos quadrados das diferenças entre as frequências esperadas e as frequências observadas, se a soma ultrapassar um determinado valor tabelado, a hipótese nula é rejeitada (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011), descartando-se assim a distribuição inicialmente hipotetizada como a mais adequada na modelagem do conjunto de dados. Do contrário, a hipótese não será rejeitada e a hipótese nula será considerada.

O teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) funciona de maneira análoga ao teste χ^2 . No entanto, sua distinção para este se baseia no fato de que o teste K-S é um teste não paramétrico, no qual se compara pontualmente as frequências acumuladas (e não frequências absolutas, como no teste χ^2) a partir dos dados do conjunto amostral com a função Distribuição Acumulada do modelo hipotetizado (VACCARO, 1997). Dessa forma, segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), o teste K-S consegue utilizar a melhor informação contida na amostra de dados. Ainda segundo os autores, o teste K-S se mostra mais adequado em situações em que existem poucos dados amostrais disponíveis para análise.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Dados coletados dos transportadores de correia de calcário da fábrica de cimento são analisados de acordo com padrões de criticidades detalhados, a fim de determinar quais serão objetos do estudo de Confiabilidade. O resultado deste estudo encaminha uma análise de melhoria do transportador mais crítico com base em seu histórico de falhas.

3.1. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do presente trabalho, o procedimento de pesquisa empregado teve como base um amplo conjunto de dados de paradas de transportadores de correia. Os dados da amostra foram coletados na unidade fabril de uma grande empresa multinacional brasileira que possui um portfólio com operações em vários setores estratégicos da economia – cimento, metais, mineração, siderurgia, energia, celulose, suco de laranja e financeiro, e que está presente em vinte países. A unidade fabril está localizada em Sobradinho, região administrativa do Distrito Federal.

Os transportadores de correia estudadas são utilizadas para o transporte de calcário, matéria-prima básica para a fabricação do cimento (SANTI, 2003). Com base nisso, para a realização do presente estudo, os dados coletados contemplaram prioritariamente os transportadores de correia que compõe os processos da Britagem e Moagem de Cru.

Ambos os processos são destacados como aqueles que possuem o maior número de correias que fazem o transporte de calcário. As tags de identificação dos processos e transportadores de correia, e seu posicionamento ao longo da cadeia produtiva são trazidas nas **Tabelas 3.1 e 3.2** e ilustradas nas telas de supervisão de processo nas **Figuras 3.1 a 3.4**.

Tabela 3.1. Tag de identificação de processos da produção de cimento.

Processo	Tag de Processo
Britagem	A1
Dosagem	L1
Moagem de Cru	R3

Tabela 3.2. Tag de identificação de transportadores de correia de calcário da fábrica de cimento.

Número de referência	Tags dos equipamentos	Tag de processo correspondente
1	A1J02 Transportador de Correia	A1
2	A1J04 Transportador de Correia	A1
3	A1J05 Transportador de Correia	A1
4	A1J06 Transportador de Correia	A1
5	A1J07 Transportador de Correia	A1
6	A1J08 Transportador de Correia	A1
7	A1J09 Transportador de Correia	A1
8	A1J10 Transportador de Correia	A1
9	A1J11 Transportador de Correia	A1
10	L1J02 Transportador, Correia, 30,00 (POL.)	L1
11	L1J03 Transportador, Correia, 30 (POL.)	L1
12	R3A02 Transportador, Correia, 48 (POL.)	R3
13	R3A07 Transportador, Correia, 30 (POL.)	R3
14	R3A08 Transportador, Correia, 30 (POL.)	R3
15	R3A09 Transportador, Correia, 30 (POL.)	R3
16	R3A11 Transportador, Correia, 74,00 (POL.)	R3
17	R3J02 Transportador, Correia, 24 (POL.)	R3

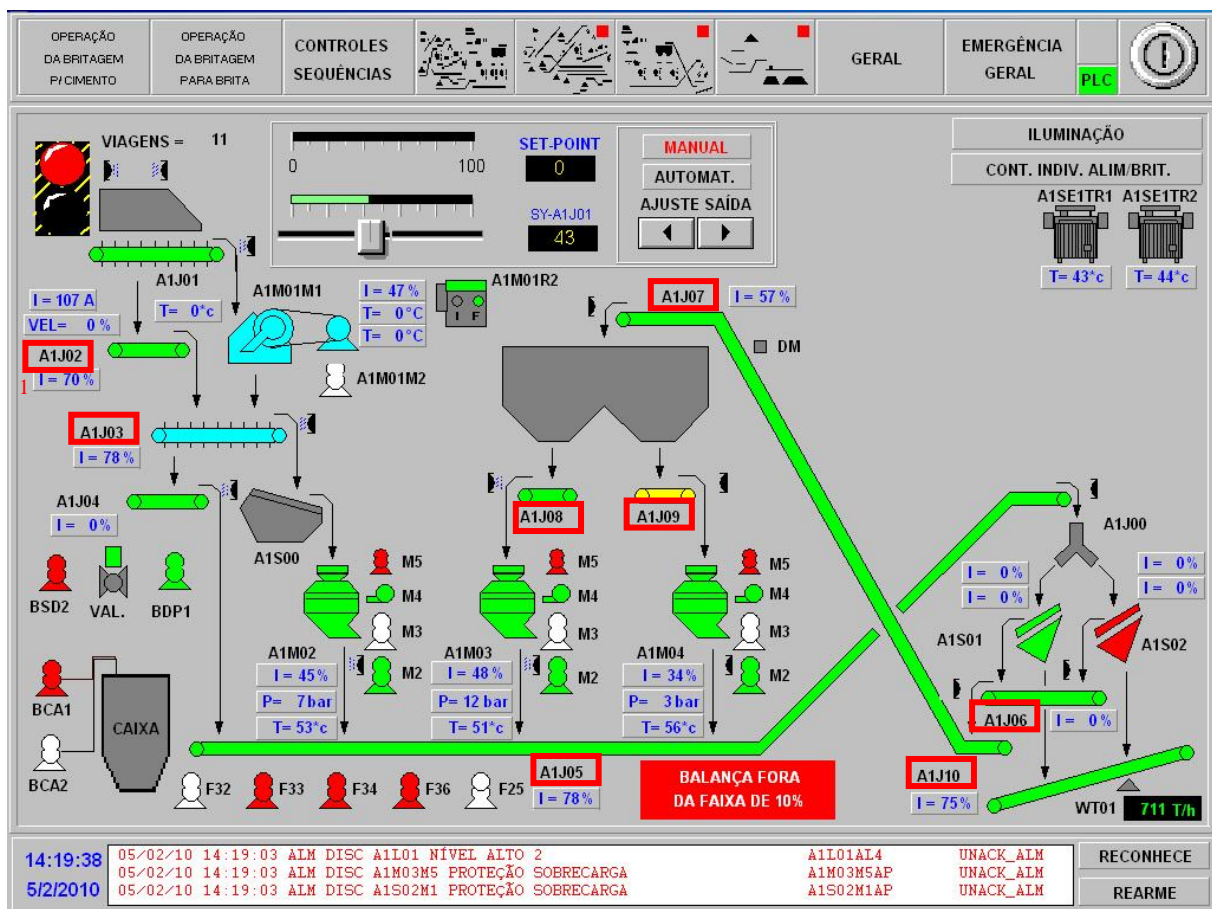


Figura 3.1. Tela de supervisão do processo Britagem. Correias A1J02, A1J03, A1J05, A1J06, A1J07, A1J08, A1J09, A1J10 (em vermelho).

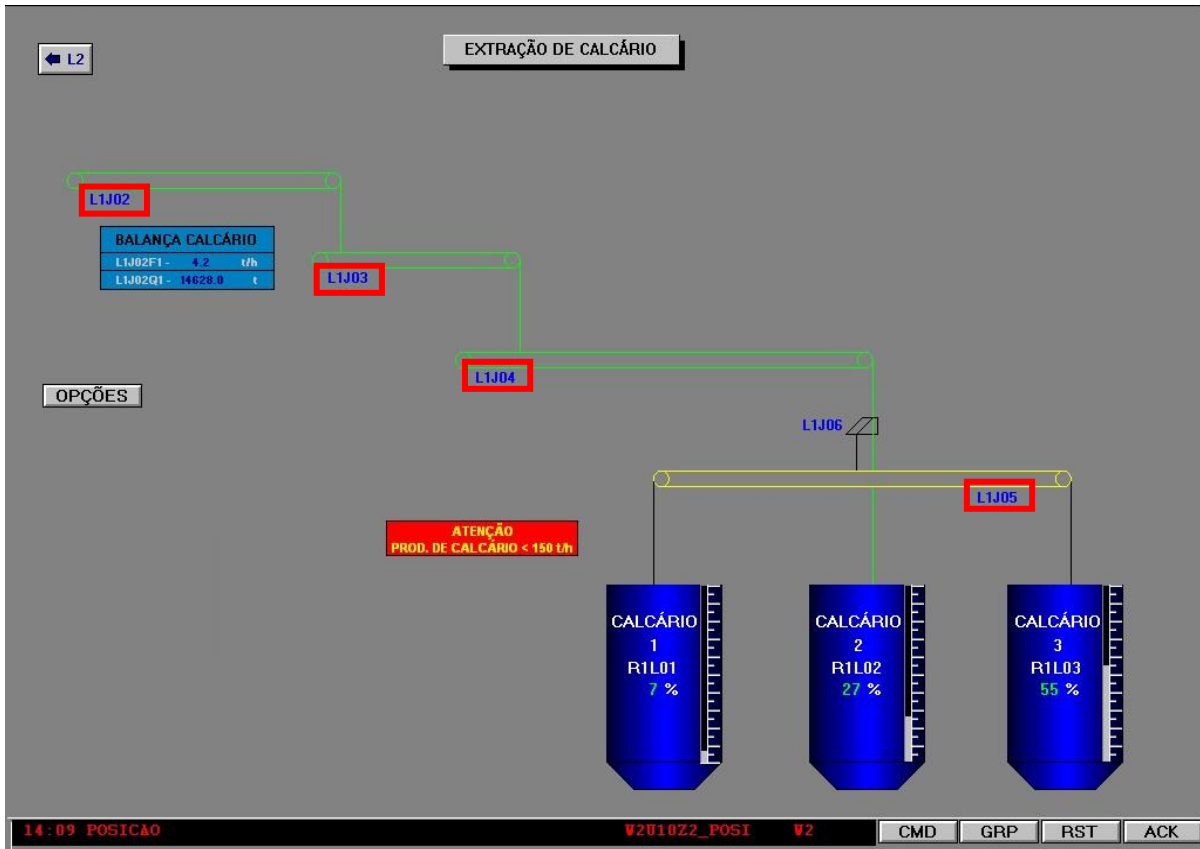


Figura 3.2. Tela de supervisorío do processo Dosagem. Correias L1J02, L1J03, L1J04, L1J05.

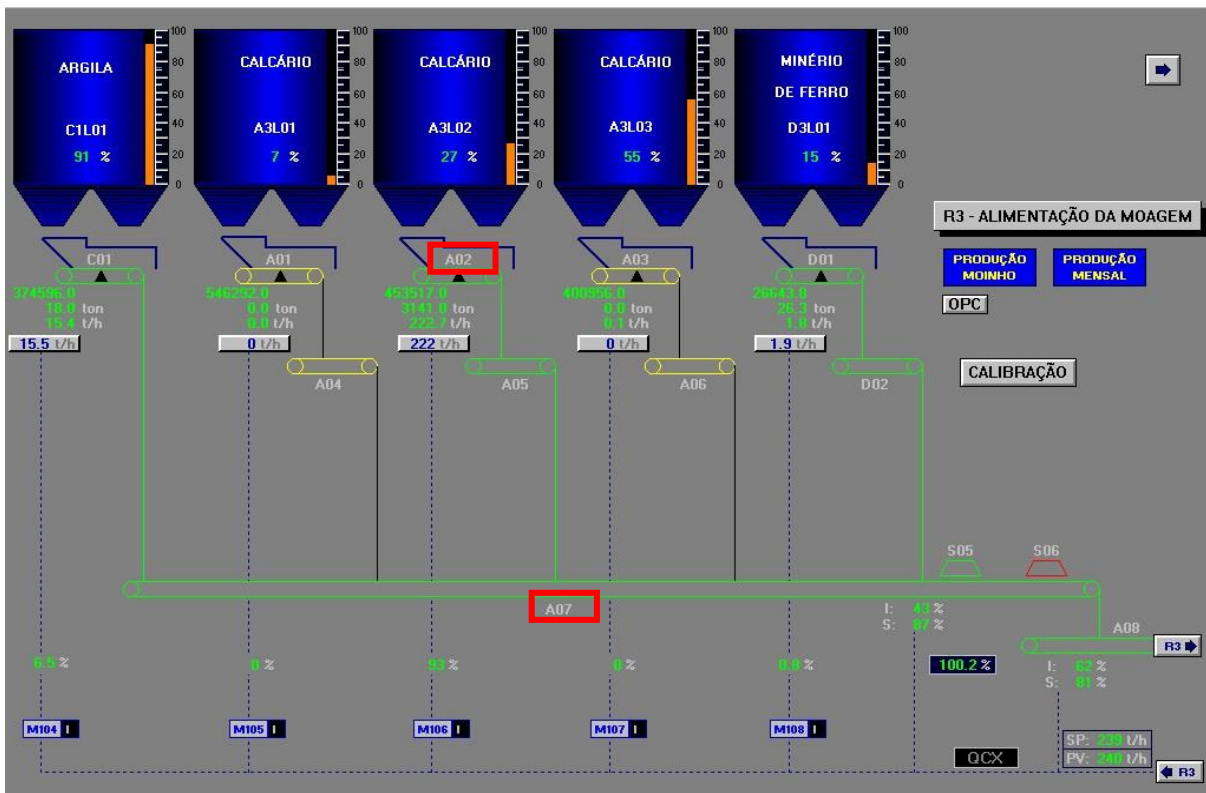


Figura 3.3. Tela de supervisorío do processo Dosagem. Correias R3A02, R3A07 (em vermelho).

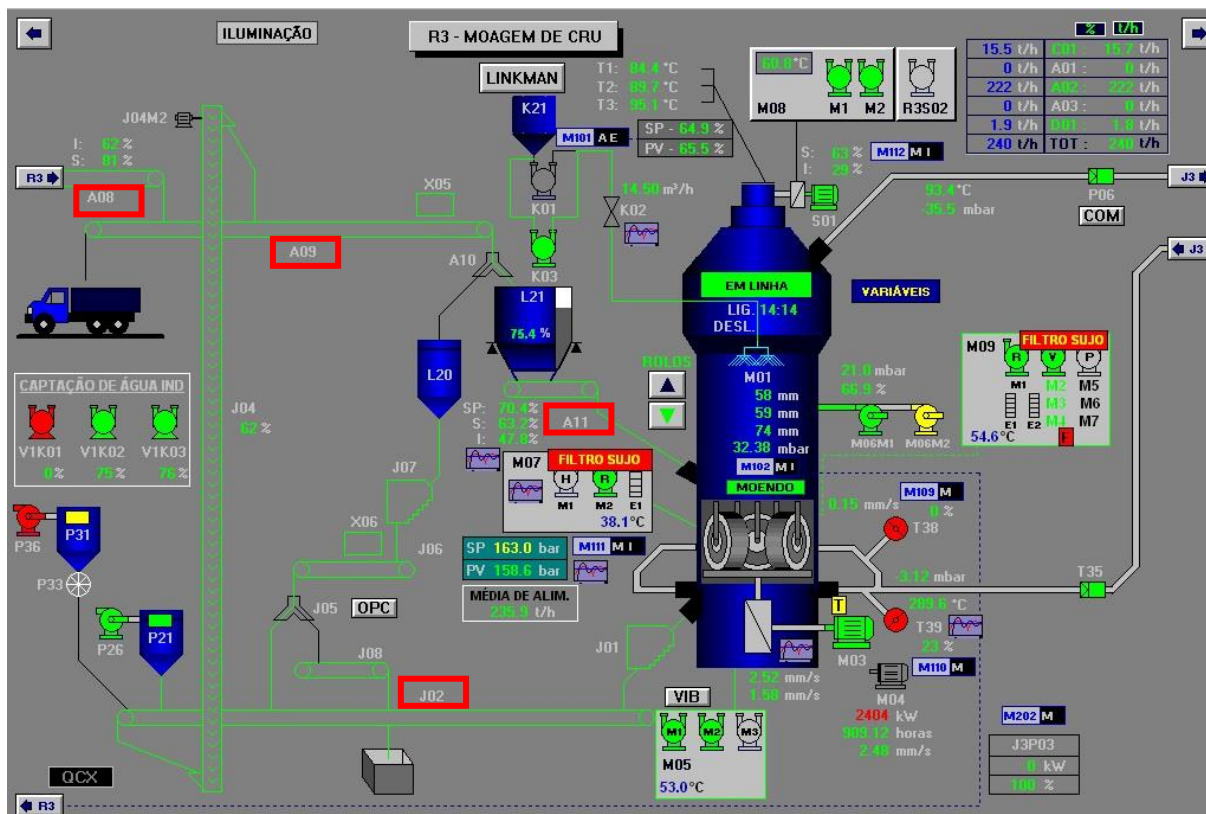


Figura 3.4. Tela de supervisório do processo Moagem de Cru. Correias R3A08, R3A09, R3A11, R3J02 (em vermelho).

Os demais transportadores de correia observados nas telas de supervisório dos processos ilustrados nas Figuras 3.1 a 3.4 que não aparecem listadas na Tabela 3.2, não foram alvo de estudo devido ao pequeno conjunto amostral de dados que apresentam, inviabilizando seu uso para o desenvolvimento das análises, bem como algumas delas não realizam o transporte de calcário, mas sim de outros tipos de materiais existentes nessa etapa do processo, como a argila, por exemplo.

3.2. INTERPRETAÇÃO E MÉTODO DE ANÁLISE DE DADOS

A base de dados correspondente as paradas das transportadores de correia analisadas no presente estudo contemplam um histórico de aproximadamente nove anos de registros, começando no ano de 2010. O relatório de paradas é gerado por meio do sistema PI (Plant Information), recurso da desenvolvedora de softwares OSISoft®. O sistema PI corresponde a um conjunto de módulos de software servidor/cliente e desempenha a função de monitoramento e análise de plantas de processo em tempo real. A interface de acompanhamento de paradas da qual gerou-se o relatório que serviu de base para desenvolvimento desse estudo é ilustrado na Figura 3.5. Neste coletam-se informações a respeito do equipamento que teve sua operação interrompida, o processo do qual faz parte, o horário em que aconteceu a parada, bem como o horário em que o equipamento voltou a operar.

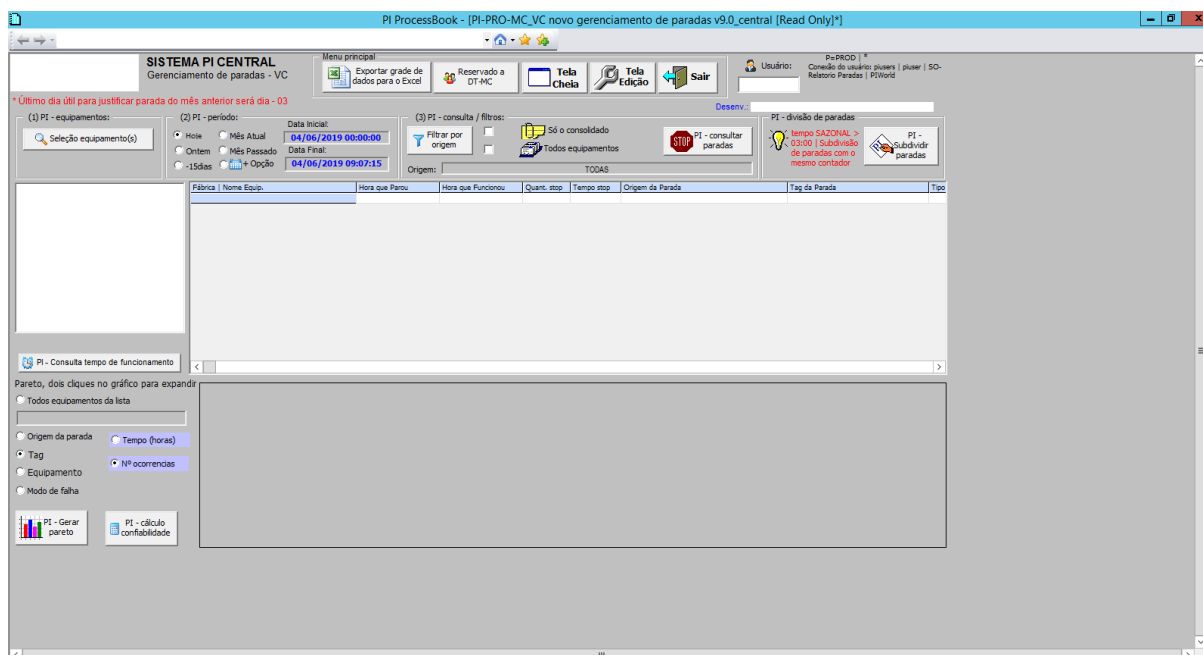


Figura 3.5. Layout do Sistema PI Central - Gerenciamento de Paradas.

O relatório ainda disponibiliza campos que trazem informações sobre o ocorrido, as quais são de extrema importância para gestão da manutenção, cálculo de indicadores e estudos de confiabilidade realizados dentro da unidade fabril. Na Figura 3.6 é possível observar algum desses campos.

Figura 3.6. Layout da janela de registro de informações sobre parada de equipamento.

Um desses campos é “Origem da parada”. O preenchimento deste campo é feito com base em um padrão corporativo da empresa. As paradas de equipamentos são classificadas, de acordo com o padrão, em Programadas (S, do inglês *Scheduled*), Incidentais (I, do inglês *Incidental*) e Circunstanciais (C, do inglês *Circumstantial*). As paradas programadas são planejadas como parte da manutenção preventiva ou qualquer outro plano controlado. As paradas incidentais são consequência de falhas ou mal comportamento. E as paradas circunstanciais são decorrentes de fatores externos não relacionados com a operação do equipamento. Para efeito do presente estudo, somente foram consideradas as paradas de ordem incidentais. O tratamento dessas paradas fica a cargo da área de manutenção e produção da empresa, e impactam diretamente nos indicadores que são de responsabilidade desses setores, incluindo-se os indicadores da área de confiabilidade, como o MTBF. As paradas incidentais se subdividem nas seguintes classificações trazidas na **Tabela 3.3**:

Tabela 3.3. Classificação de paradas incidentais da fábrica de cimento estudada.

Origem de parada	Descrição
I1 - MANUTENÇÃO ELÉTRICA	Parada por defeito ou falha de natureza elétrica, instrumentação ou automação. Exemplos: defeito elétrico em balança dosadora, inversor de frequência, transdutor de pressão, subestação.
I2 - MANUTENÇÃO MECÂNICA	Parada por defeito ou falha de natureza mecânica. Exemplos: defeito mecânico em redutor, correia transportadora, elevador.
I3 - PROCESSO	Qualquer problema de processo e/ou operacional que cause parada do equipamento. Exemplos: entupimento de calha, falta de abastecimento de matéria-prima interna, falha operacional.
I4 - REFRAATÓRIOS	Parada em função da necessidade de executar manutenção corretiva no refratário do forno, resfriador ou torre de ciclones.
I5 - INDUZIDA POR OUTROS EQUIPAMENTOS	Ocorre quando uma parada incidental de um equipamento ocasiona a parada de um ou mais equipamentos seguintes a ele. Parada induzida se aplica somente para equipamentos até a fase de clínquerização.

Com o filtro aplicado à base de dados, de acordo com os objetivos do presente estudo, foi possível identificar, dentre o conjunto dos transportadores de correia da **Tabela 3.2**, os que possuem um maior espaço amostral de paradas de ordem incidental. Levou-se em consideração também, para efeito da análise realizada, a quantidade de horas que os equipamentos, e consequentemente a planta industrial,

tiveram que ficar parados devido as falhas nos equipamentos. O gráfico da **Figura 3.7** e sua respectiva **Tabela 3.4** apresentam este cenário.

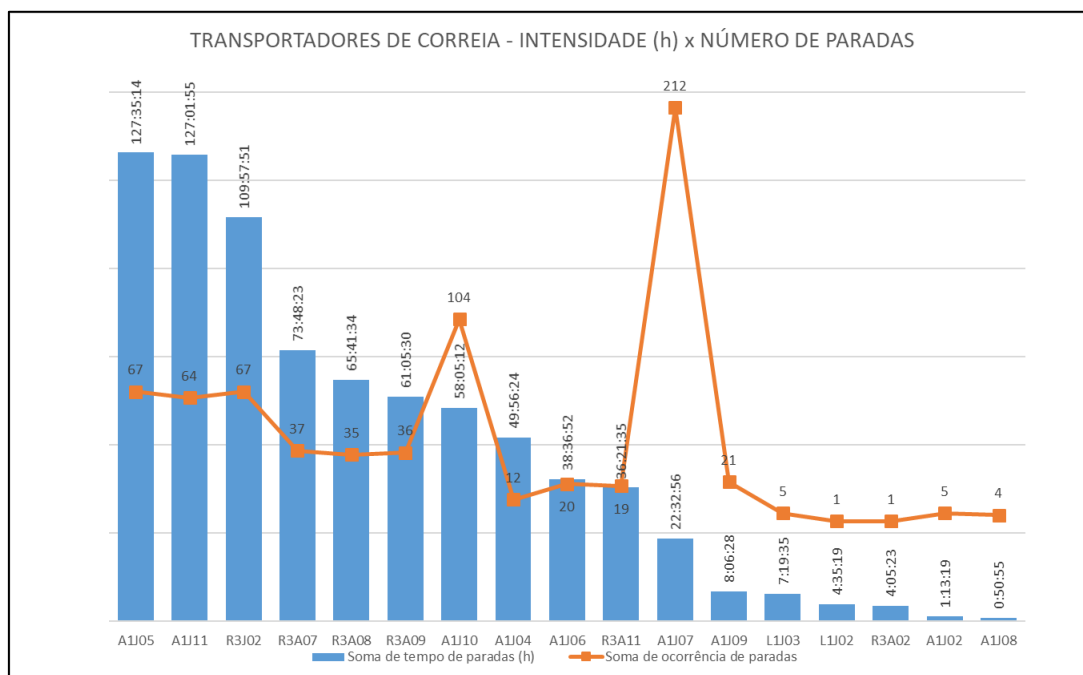


Figura 3-7 Gráfico de intensidade (h) x número de paradas das correias estudadas.

Tabela 3.4. Número de horas e paradas registrados no gráfico da Figura 3.6

Tag de Equipamentos	Horas de Paradas	Número de Paradas
A1J05	127:35:14	67
A1J11	126:45:22	62
R3J02	109:57:51	67
R3A07	73:48:23	37
R3A08	65:41:34	35
R3A09	61:05:30	36
A1J10	58:05:12	104
A1J04	49:56:24	12
A1J06	38:36:52	20
R3A11	36:21:35	19
A1J07	22:32:56	212
A1J09	8:06:28	21
L1J03	7:19:35	5
L1J02	4:35:19	1
R3A02	4:05:23	1
A1J02	1:13:19	5
A1J08	0:50:55	4
Total Geral	796:37:52	708

Dessa forma, com base no levantamento feito, identificou-se que os transportadores de correia A1J05 e A1J11, que compõe o processo Britagem, bem como o transportador R3J02, que compõe o

processo Moagem de Cru, foram aquelas que tiveram maior impacto em termos de quantidade de horas paradas, e conseqüentemente, maior impacto na produção. Apesar de não possuírem os maiores espaços amostrais, os quais foram registrados para os transportadores A1J07 (212 paradas) e A1J10 (104 paradas), os transportadores mencionados também possuem uma quantidade razoável de paradas (67, 62 e 67, respectivamente), o que os tornam transportadores com criticidade relevante dentre os apresentados. Os demais, apesar de sua relevância dentro do processo, acabaram não sendo contempladas no estudo, já que não apresentaram o mesmo impacto em termo de número de horas paradas do equipamento, ou mesmo tendo um baixo espaço amostral. Este fato, porém, não exclui a possibilidade de tais transportadores passarem por um processo de melhoria mecânica como consequência do resultado do presente estudo. Ações de abrangência de melhoria mecânica aplicadas a inúmeros equipamentos com base em estudos realizados em pequenas amostras são comuns dentro do setor de manutenção de unidades fabris.

Após a análise realizada, foi selecionada então a amostra de dados das três transportadores de correias que apresentaram maior criticidade, ou seja, maior impacto em termos de horas interrompidas de operação, e número significativo de paradas. Tais equipamentos, como já citado, foram a A1J05, A1J11 e R3J02. Os tempos até falhas (em horas) dessas correias no período analisado são apresentadas nas **Tabelas 3.5 a 3.7**.

Tabela 3.5. Conjunto amostral de dados de tempo até falha da correia A1J05.

A1J05 Tempo até Falha (h)										
34,30	0,13	6,03	821,48	791,25	358,97	391,88	935,55	1036,33	184,78	2267,13
235,12	336,07	307,13	59,88	288,82	0,10	102,38	47,43	15,42	11,18	1,15
2,48	6,55	14,52	0,08	72,87	1654,82	117,70	499,58	65,80	220,88	452,65
344,02	23,70	6,13	23,92	74,87	255,47	443,82	142,45	23,15	498,03	1230,10
632,10	0,22	150,48	42,38	253,20	1281,77	1742,07	523,83	2020,53	1009,77	1142,92
26,38	254,55	1295,83	3,62	33,58	65,95	46,33	22,03	128,52	3,40	0,10

Tabela 3.6. Conjunto amostral de dados de tempo até falha da correia A1J11.

A1J11 Tempo até Falha (h)										
3430,63	1,52	450,55	0,30	1816,80	202,13	42,85	1748,17	3,62	385,83	0,15
5,13	0,08	11,42	133,33	119,52	0,10	0,72	0,10	1729,55	2986,05	8,43
912,90	166,28	0,25	55,75	21,32	13,73	0,33	6,63	0,08	5,97	28,98
790,88	1495,37	0,12	13,83	1158,70	155,48	1643,92	343,63	48,82	509,42	13,63
466,68	0,40	2,93	2,57	3,00	7,58	9,20	3,57	9,03	0,38	6,32
47,20	3,60	10,33	193,15	134,48	250,28					

Tabela 3.7. Conjunto amostral de dados de tempo até falha da correia R3J02.

R3J02 Tempo até Falha (h)										
1315,03	191,27	266,97	1033,30	564,60	2710,88	0,23	88,13	178,80	10,62	130,02
480,27	792,90	316,15	263,63	1,32	45,43	0,40	0,38	242,07	1410,70	47,52
527,43	14,05	7,42	2,02	7,10	58,40	18,18	2,05	1037,83	1411,67	64,07
22,78	85,95	369,62	20,67	552,07	0,27	1766,72	94,60	20,22	1243,97	1590,82
2254,35	38,63	2469,15	3204,57	2941,65	1734,77	820,78	141,73	1932,55	6049,92	2840,70
498,33	4186,98	912,47	7310,88	94,48	2952,45	0,87	3,08	494,40	274,48	851,90

Dada a importância da transportador de correia dentro do processo produtivo de uma fábrica de cimento, decidiu-se estudar a sua confiabilidade. Para isso, foram escolhidos modelos de distribuição com aderência aos dados de tempos até a falha dos equipamentos selecionados. Utilizou-se o *software* ProConf (FRITSCH; RIBEIRO, 1998).

O ProConf é um *software* que faz uso de métodos analíticos e gráficos para ajustar amostras de tempos até falha e de reparo a distribuições de probabilidade. O aplicativo testa o ajuste dos dados aos seguintes modelos paramétricos: exponencial, gama, normal, lognormal e *Weibull*.

O método gráfico foi utilizado para comparar as curvas de cada distribuição e verificar qual o modelo é assumido pela curva real encontrada a partir dos dados das **Tabelas 3.5 a 3.7**. Dessa forma, o método apresenta a melhor aderência dentre os modelos aos dados amostrais. Para a caracterização da distribuição de frequência, foram aplicados testes de aderência aos modelos paramétricos. Para verificar o ajuste destas distribuições aos dados foram aplicados os testes do qui-quadrado (χ^2) e Kolmogorov-Smirnov (K-S) (FRITSCH; RIBEIRO, 1998) amplamente difundidos na literatura. Para cada teste, o *software* informa o nível de significância e aponta quais distribuições podem ou não ser rejeitadas. A validação da distribuição testada é dada se o nível de significância for maior que 5% em ambos os testes de aderência.

Uma vez definido a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta aos tempos entre falha em estudo, os parâmetros populacionais correspondentes a essa distribuição são estimados por máxima verossimilhança, um dos métodos mais difundidos. Além disso, foram apresentadas as representações das funções de confiabilidade e de risco ou taxa de falha.

Para o caso de todas distribuições de probabilidade serem rejeitadas para uma determinada amostra de dados após os testes de aderência realizados, seleciona-se aquela que, por meio do método gráfico, mais se aproxima da reta real da amostra.

3.3. METODOLOGIA PARA ESTUDO DE MELHORIA DE TC'S

As conclusões do estudo de confiabilidade realizado levaram a identificação do transportador de correia que, baseado na avaliação dos resultados do estudo, pode ser considerado como o mais crítico dentre aqueles que serviram de objeto da análise.

Com o intuito de melhorar a confiabilidade do equipamento selecionado, um estudo foi realizado com o objetivo de implementar melhorias aplicáveis a este transportador, tendo como ênfase mudanças que reduzam a incidência de paradas classificadas como I2 – MANUTENÇÃO MECÂNICA, conforme descrito na **Tabela 3.3**.

Uma abordagem baseada no histórico operacional e de manutenção do transportador foi inicialmente realizada, a fim de se identificar quais as origens de parada mais penalizaram a operação do equipamento no período analisado. A partir do cenário apresentado, foi possível observar o nível de incidência de paradas por problemas mecânicos no transportador. O gráfico da **Figura 3.8** ilustra uma análise inicialmente feita com o conjunto de todas os transportadores estudados. Essa análise foi posteriormente discretizada nos resultados para o transportador selecionado no estudo de Confiabilidade, conforme visto na **Figura 4.7**.

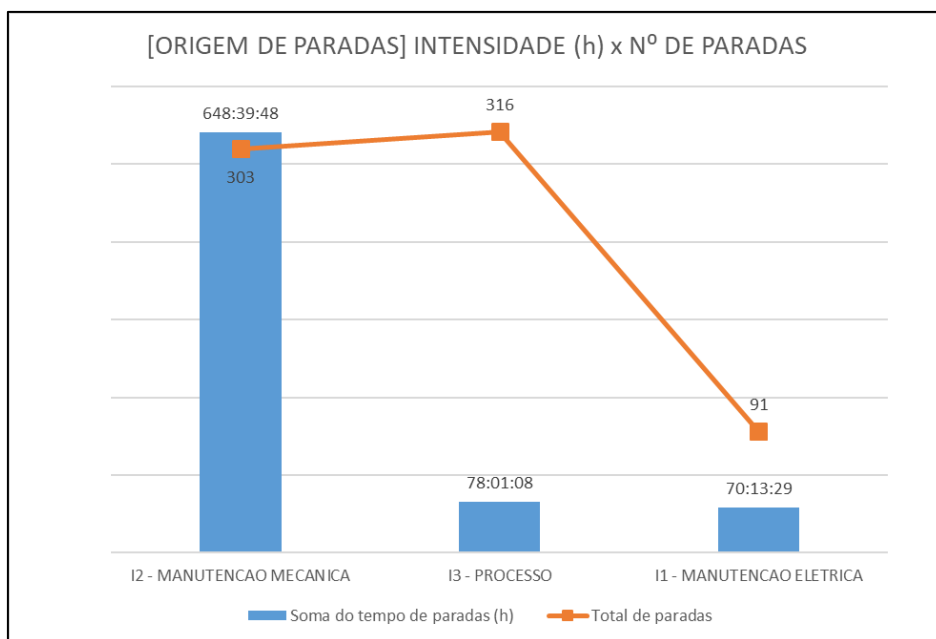


Figura 3.8 Gráfico de intensidade por frequência de origem de parada

Dessa forma, visto que as origens de parada mecânica são as mais críticas para a operação dos transportadores, um levantamento similar quanto ao número de horas e número de paradas foi feito, porém, levando-se em consideração somente os modos de falha que resultaram em paradas incidentais mecânicas. O gráfico da **Figura 3.9** apresenta o impacto dos dez modos de falha mais críticos registrados no conjunto dos transportadores de correia estudados. Novamente, análise similar quanto ao

transportador selecionado após resultado do estudo de Confiabilidade foi apresentada nos resultados por meio da **Figura 4.8**.

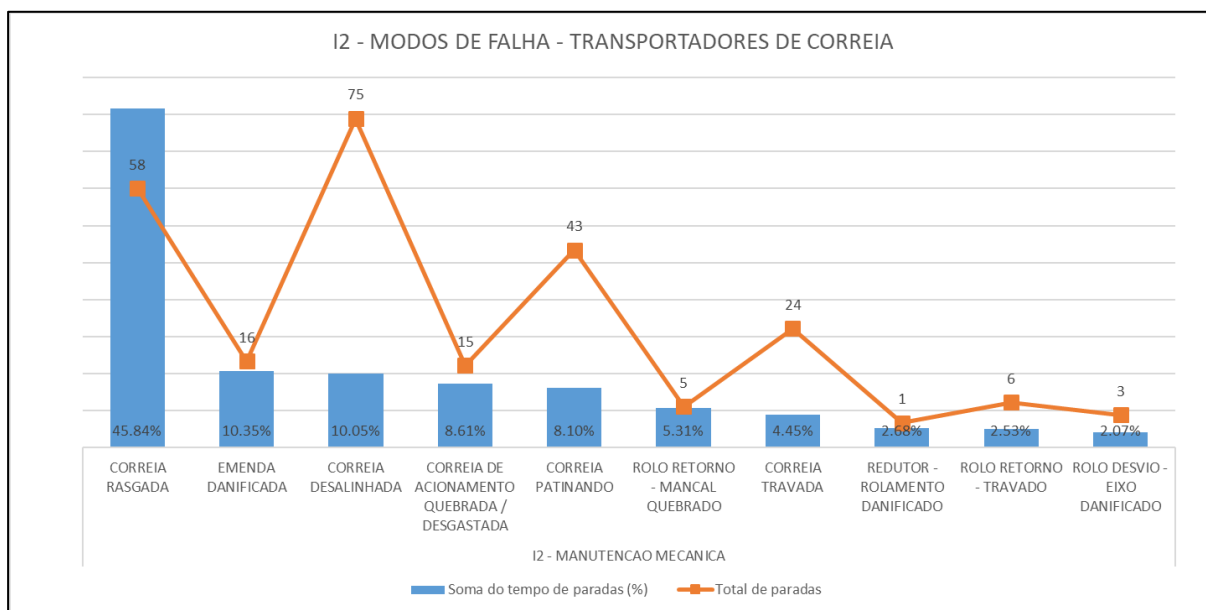


Figura 3.9 Intensidade por frequência de modos de falha em TCs

Do gráfico da **Figura 3.9**, percebe-se que, do conjunto de falhas ocorridas nos transportadores, de maneira geral, problemas relacionados a correia transportadora foram os modos de falha mais críticos para a operação dos transportadores, representando cerca de 79% do tempo total em que os transportadores ficaram fora de operação. A mesma conclusão se observou em relação a correia alvo do estudo de melhoria, a ser apresentada nos resultados. Outros componentes importantes do transportador, tais como tambores, roletes e o sistema de acionamento também se encontram na lista dos mais críticos apresentados no gráfico da **Figura 3.9**, porém observa-se um nível de impacto menor quando comparado com problemas ocorridos na correia. Problemas como os ocorridos nesses componentes podem ser evitados de acordo com a realização de estudos similares ao do presente trabalho, bastando a análise particular de cada caso, a exemplo do que foi feito presente estudo de melhoria, como também uma maior atenção do setor de manutenção, o qual deve agir antes que determinados tipos de falha ocorram.

Ao identificar uma maior incidência de falhas ocorridas nas correias transportadoras, priorizou-se inicialmente no estudo possíveis melhorias voltadas a esse componente do transportador selecionado. Para isso, com base em informações do Manual Técnico de Correias Transportadoras (MERCÚRIO, s/d), listou-se possíveis causas que resultam em rasgos na correia, as quais são listadas a seguir:

- Desgaste da correia devido a seleção incorreta do tipo aplicado em relação ao material que está sendo transportado, reduzindo sua vida útil e podendo vir a falhar prematuramente;
- Desgaste da correia devido a não conformidades nos demais componentes do transportador, tais como, roletes danificados, travados ou caídos (**Figura 3.10**);



Figura 3.10 Cavalete sem rolete de carga (Arquivo Pessoal)

- Desalinhamento da correia, o que pode provocar o atrito da correia com demais componentes ou com a estrutura do transportador, colaborando para possíveis cortes transversais nas bordas da correia, podendo vir a rasgá-la de maneira mais crítica (**Figura 3.11**);



Figura 3.11 Correia Desalinhada (Arquivo Pessoal)

- Acúmulo de material entre os rolos e a correia, acentuando seu desgaste, diminuindo assim sua vida útil, podendo vir a rasgá-la (**Figura 3.12**);



Figura 3.12 Acúmulo de material entre tambor e correia (Arquivo Pessoal)

- Ausência de mesa de impacto no ponto de descarga de material na correia para aplicações específicas;
- Passagem de material fora da especificação para a qual a correia foi designada, podendo vir a danificá-la durante o transporte, resultando em rasgos da correia.

De conhecimento dessas causas, buscou-se então no histórico do equipamento por aquelas que foram as mais determinantes em termos do impacto mensurado em horas paradas e número de ocorrências por correia rasgada no transportador estudado.

Para a situação da causa mais determinante ser uma possível aplicação incorreta do tipo de correia quanto ao material transportado e características gerais do transportador, o estudo de melhoria voltado para esse tipo de situação contou com o apoio da fabricante CORREIAS MERCÚRIO S/A, a qual possui contrato com a fábrica de cimento estudada, além de possuir um catálogo vastos de produtos que podem ser mais adequados a aplicação do transportador, e o *know-how* em relação as propriedades físicas de suas correias, apresentando todas as especificações técnicas necessárias para a análise.

Neste processo, em vista das opções apresentadas pela fabricante, e das informações concedidas pela mesma em relação as propriedades de suas correias, utilizou-se de uma ferramenta de priorização para auxiliar no processo de escolha da correia a ser implementada. Essa ferramenta foi a matriz de decisão (SEBRAE, s/d). Para utilização dessa ferramenta, definiu-se critérios, os quais, foram utilizados na avaliação das alternativas selecionadas. Para cada critério atribuiu-se um peso, o qual, varia de acordo com a ordem de importância do critério analisado (maiores pesos denotam maior importância do critério, e vice-versa). Dessa forma, notas foram aplicadas as alternativas de acordo com cada critério avaliado, variando na proporção em que atendiam ou não ao critério. Ao final, obteve-se uma nota ponderada,

calculada com base na soma dos produtos entre a nota dada e o peso do critério avaliado (SEBRAE, s/d). Com isso, consegue-se selecionar a opção que mais atende aos critérios. Para o caso do estudo feito, a matriz de decisão aplicada encontra-se apresentada nos resultados do estudo na **Tabela 4.10**. Seu resultado definiu a aplicação de uma correia que se mostrou mais adequada, em relação aos critérios avaliados, para o transporte de calcário no transportador de correia estudado.

Tendo sido feito a seleção de uma nova correia para implementação no transportador estudado, realizou-se o cálculo de transportadores de correia com base na metodologia prevista no “MANUAL DE TRANSPORTADORES DE CORREIA FAÇO, 1996” a fim de garantir que o transportador possa operar dentro da condição ideal para o qual foi projetado, agora com uma nova correia. O manual FAÇO (1996) segue as normas brasileiras relativas ao projeto de transportadores de correia para produtos à granel e apresenta as etapas a serem seguidas de forma concisa e intuitiva. Como não é o objetivo deste estudo demonstrar o desenvolvimento das equações, os valores calculados para os parâmetros foram substituídos diretamente nas fórmulas fornecidas no manual. Com base nos cálculos realizados, é possível identificar a necessidade ou não de alterações a serem feitas no transportador, de acordo com as condições de contorno aplicadas. Segundo o manual FAÇO (1996), para realização dos cálculos, as condições de contorno que se fazem necessária são:

- **Características do material a ser transportado:** tipo, granulometria, peso específico, temperatura, teor de umidade, abrasividade, capacidade de escoamento, ângulo de repouso, entre outros;
- **Perfil do transportador:** comprimento entre centros de tambores extremos, altura de elevação ou de declive;
- **Capacidade desejada;**
- **Condições de operação:** condições ambientais, regime de funcionamento;
- **Características especiais (caso existam):** correia reversível, com tripper, cabeça móvel, transportador móvel (“shuttle”);

As informações necessárias ao transportador selecionado foram apresentadas juntamente com o resultado dos cálculos efetuados nos resultados (**Tabela 4.12**).

Nesse processo, também foi relevante, além dos critérios seguidos no manual FAÇO (1996), as recomendações quanto ao dimensionamento dos tambores feito com base nas especificações técnicas da fabricante da correia. O método de cálculo aplicado se baseia na determinação da tensão na correia de acordo com as fórmulas previstas no manual FAÇO (1996), e de acordo com a largura da correia e sua tensão admissível, seleciona-se o diâmetro do tambor dentro de uma faixa de tensão aplicada nas tabelas apresentadas pelo fabricante. Os cálculos realizados, bem como as tabelas do fabricante, foram apresentados nos resultados. Segundo o Manual Técnico de Correias Transportadoras (MERCÚRIO, s/d), a seleção do diâmetro dos tambores é fator fundamental na manutenção da vida útil da correia, pois uma vez que se tenha uma correia não condizente com o diâmetro do tambor selecionado, a correia não

resistirá a severidade da flexão, desintegrando alguns de seus componentes, tais como revestimento e carcaça. Neste contexto, a área da emenda se torna a mais crítica, uma vez que ela é o ponto mais fraco da correia (MERCÚRIO, s/d).

Para modos de falhas relacionados a outros componentes dos transportadores de correia estudados, uma análise particular de cada caso deve ser feita. Para o transportador de correia alvo do estudo de melhoria, foi aplicada a metodologia proposta quanto ao cálculo de componentes do transportador do manual FAÇO (1996) e cálculo de elementos de máquinas apresentados no “Elementos de Máquinas de Shigley, 2011”. Utilizou-se o *software Microsoft Excel® 2019* para o desenvolvimento da planilha com os cálculos realizados.

Com a conclusão e implementação das melhorias feitas com base no estudo desenvolvido, uma análise de Confiabilidade do transportador de correia selecionado é novamente realizada. Nessa análise, feita por meio do *software Proconf*, medidas de Confiabilidade, com destaque para o MTBF, foram mensuradas a fim de se avaliar a efetividade das melhorias realizadas no transportador do ponto de vista de aumento ou não de sua confiabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo de Confiabilidade dos transportadores de correia selecionados é feito, caracterizando os comportamentos de confiabilidade, de probabilidade de falha e taxa de falha a partir de modelagem dos tempos até falhas dessas correias. O transportador considerado mais crítico pelo estudo inicial é estudado e melhorias são propostas e implementadas visando o aumento de sua confiabilidade.

4.1. ESTUDO DE CONFIABILIDADE DOS TRANSPORTADORES DE CORREIA

Inicialmente, com o auxílio do *software* ProConf, foram processados os dados correspondentes ao conjunto de tempos entre falhas (em horas) das correias selecionadas. A partir disso, gerou-se um conjunto de histogramas relacionados as principais medidas de confiabilidade estudadas. Dentre essas medidas, verificou-se o histograma gerado para a função de risco $h(t)$, a qual demonstra a taxa de falhas para o conjunto amostral. Os gráficos de taxa de falhas de cada uma das correias estudadas são apresentados na **Figura 4.1**.

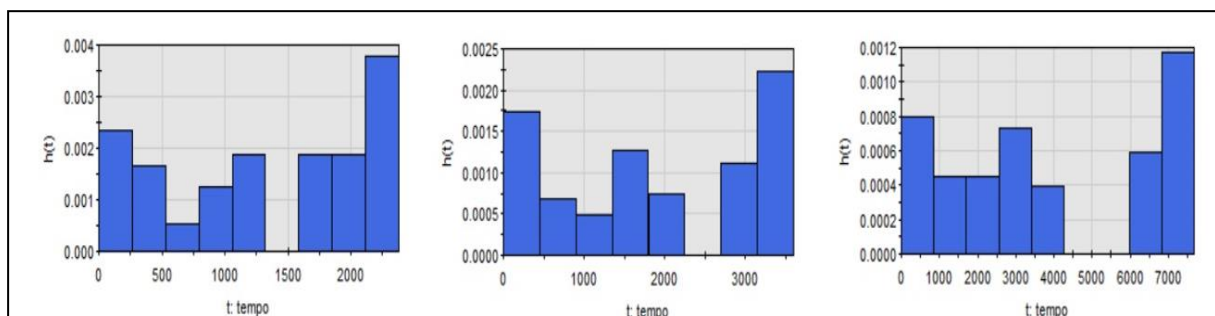


Figura 4.1. Taxa de Falha dos transportadores de correia A1J05(esquerda), A1J11 (centro) e R3J02 (direita), respectivamente (ProConf).

Na **Figura 4.1** é possível perceber que os dados, para todas as correias, apresentam uma tendência inicial de queda. Essa tendência varia em relação ao tempo entre as correias, sendo aproximadamente após 250 horas para a correia A1J05, 500 horas para correia A1J11 e 1000 horas para a correia R3J02. Esse período de queda se estende no tempo até apresentar uma ascensão da taxa de crescimento em torno de aproximadamente 1000h para a correia A1J05, 1500h para a correia A1J11 e 2000h para a correia R3J02. Esta taxa de crescimento claramente se estabiliza e se mantém aproximadamente constante ao longo do tempo, mesmo os histogramas apresentando algumas descontinuidades por conta das variações nos intervalos de tempo entre falhas registradas dentro do conjunto amostral, até apresentarem nova ascensão da taxa de crescimento. Essa última claramente se verifica após 2000h para a correia A1J05, 3000h para a correia A1J11 e 6000h para a correia R3J02.

A análise do comportamento dos dados ao longo do tempo nos gráficos apresentados ratifica um comportamento que se assemelha a curva da banheira, mesmo levando em consideração as pequenas variações apresentadas nos histogramas. Esse comportamento da função de risco é bastante representativo da distribuição de probabilidade *Weibull* o qual, segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), se faz bastante apropriada em modelagens com funções de risco constante, estritamente crescente e estritamente decrescente. Ainda segundo os autores, a distribuição de *Weibull* também se destaca em modelagens de confiabilidade devido a sua flexibilidade e capacidade de representação de amostras de tempo até falhas com comportamentos distintos, o que claramente se verifica nos conjuntos amostrais estudados através dos gráficos da **Figura 4.1**.

Após proceder a análise baseada nos gráficos da **Figura 4.1**, a distribuição de *Weibull* surge como uma possível distribuição de probabilidade para modelar adequadamente os dados estudados. A fim de verificar se tal constatação está correta, bem como verificar a possibilidade das demais distribuições também serem adequadas, fez-se necessária a realização de testes que verifiquem qual distribuição é adequada para o ajuste dos dados.

O método inicial de análise adotado foi o método gráfico, no qual, por meio dos gráficos do papel de probabilidade, compara-se visualmente a distribuição dos dados amostrais transformados em torno da reta-base que representa a distribuição estudada. Quanto mais próximo da reta base estiverem os dados, melhor será o ajuste à distribuição. As **Figuras 4.2 a 4.4** trazem os respectivos gráficos de papel de probabilidade correspondentes ao conjunto de dados das correias estudadas.

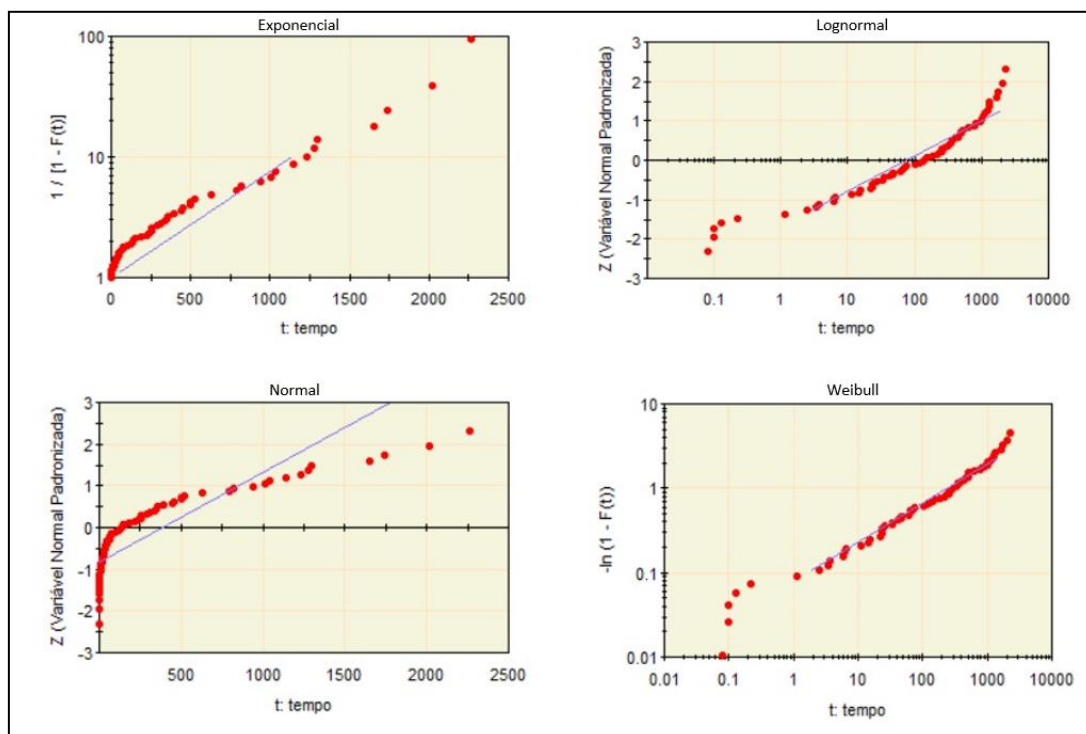


Figura 4.2 - Papel de Probabilidade do transportador de correia A1J05 (ProConf).

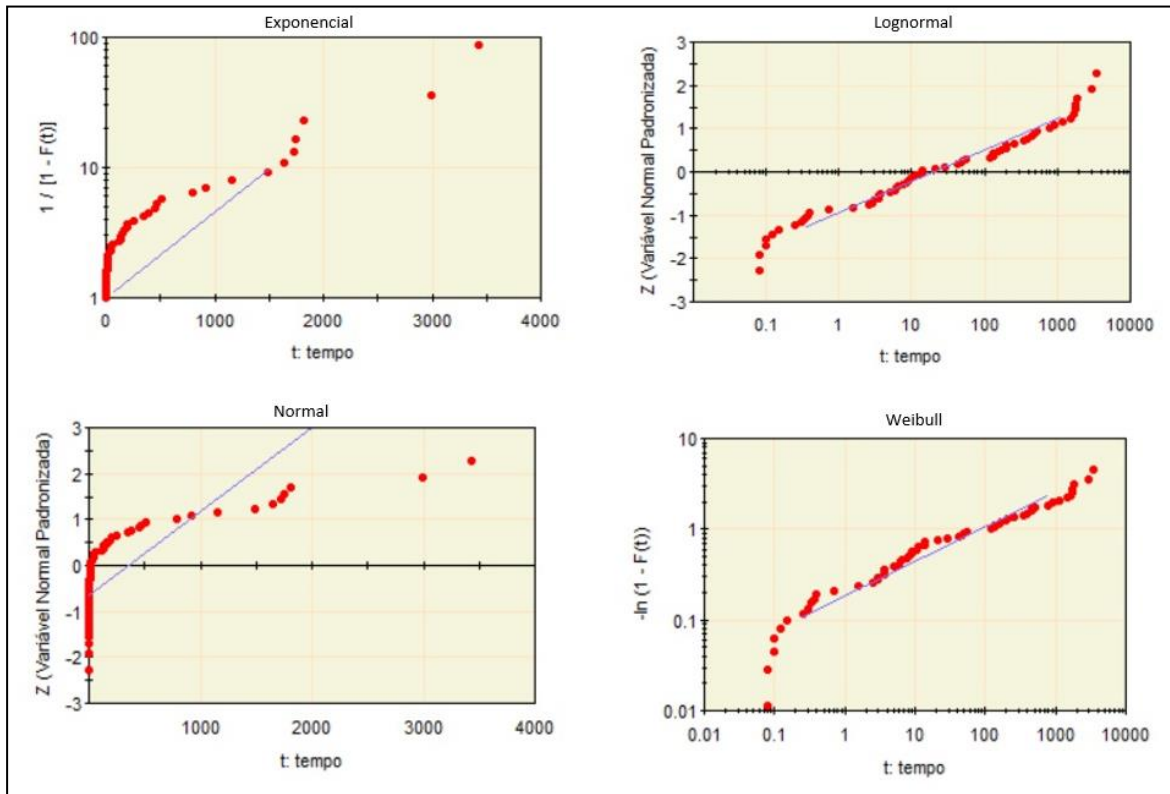


Figura 4.3 - Papel de Probabilidade do transportador de correia A1J11 (ProConf).

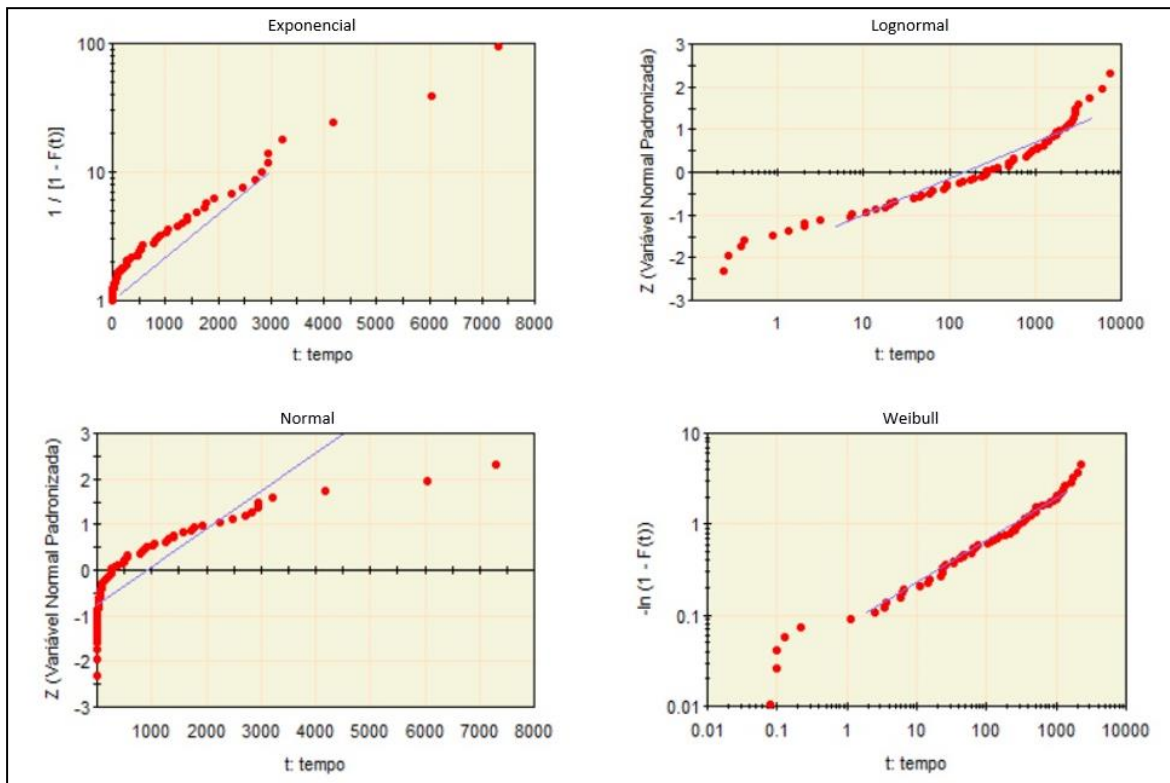


Figura 4.4 - Papel de Probabilidade do transportador de correia R3J02 (ProConf).

Pela análise visual dos gráficos apresentados verifica-se que para todas os transportadores estudados, a distribuição de probabilidade *Weibull* foi aquela que melhor se ajustou a reta. Neste

contexto, a distribuição Lognormal também apresenta um ajuste dos dados muito próximo a reta. Seu uso poderia ser justificado pelo fato de que essa distribuição tem boa aplicabilidade em modelagem de unidade reparáveis (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011). Dessa forma, ambas as distribuições se apresentam como bons modelos para modelar o conjunto de dados processado.

Os gráficos do papel de probabilidade permitem fazer o teste de hipóteses, a fim de evidenciar a adequação dos dados em relação as distribuições apontadas anteriormente. O teste pode ser feito através da aplicação dos testes de aderência, sendo estes o teste do qui-quadrado (χ^2) e Kolmogorov-Smirnov (K-S). Para isso, define-se um parâmetro populacional p como sendo o nível de significância calculado em cada teste, a fim de verificar se os dados derivam das distribuições selecionadas. Se o valor do parâmetro p em ambos os testes for inferior ou igual ao nível de significância adotado, então rejeita-se a hipótese nula de que os dados analisados seguem uma determinada distribuição. No estudo realizado, o nível de significância adotado foi de 5%. A partir disso, nas **Tabelas 4.1 a 4.3** são apresentados os resultados dos testes de aderência feitos com o auxílio do *software* ProConf.

Tabela 4.1 - Nível de Significância para ajuste dos dados do transportador A1J05 (ProConf).

A1J05 Nível de Significância			
Distribuição	χ^2	K-S	Decisão ($p > 0,05?$)
Lognormal	0,0013	0,0207	Rejeitada
Weibull	0,2173	0,2151	Não Rejeitada

Tabela 4.2 - Nível de Significância para ajuste dos dados do transportador A1J11 (ProConf).

A1J11 Nível de Significância			
Distribuição	χ^2	K-S	Decisão ($p > 0,05?$)
Lognormal	0,0060	0,1728	Rejeitada
Weibull	0,0715	0,0221	Rejeitada

Tabela 4.3- Nível de Significância para ajuste dos dados do transportador R3J02 (ProConf)

R3J02 Nível de Significância			
Distribuição	χ^2	K-S	Decisão ($p > 0,05?$)
Lognormal	0,0059	0,0132	Rejeitada
Weibull	0,2445	0,2087	Não Rejeitado

Nas **Tabelas 4.1 a 4.3** observa-se o resultado do teste de hipóteses feito a partir dos valores de significância obtidos nos testes de aderência, apontando quais as distribuições que não podem ser descartadas, ou seja, as que devem ser consideradas. Para os transportadores A1J05 e R3J02, o resultado aponta para a distribuição *Weibull* como a mais adequada para a modelagem dos seus respectivos dados. Já em relação ao transportador A1J11, para ambas as distribuições testadas, o resultado acabou sendo rejeitado de acordo com o teste de hipóteses aplicado. Neste caso, para fins de realização da modelagem dos seus dados, irá ser adotado a análise apontada pelo método gráfico para escolher a distribuição que irá ser utilizada para ajuste dos dados. Neste caso, a distribuição *Weibull* foi a escolhida, devido a distribuição dos dados amostrais transformados melhor se ajustar em torno da reta-base que representa a distribuição. Além disso, vale destacar que em um dos testes de aderência feitos (o qui-quadrado), o nível de significância para a distribuição *Weibull* ficou acima do previamente estabelecido, diferentemente da distribuição Lognormal que, em ambos os testes, ficou abaixo. Isso só reforça, dentre as distribuições analisadas, a *Weibull* como sendo a mais adequada para essa modelagem.

Uma vez definida a distribuição *Weibull* para a modelagem dos tempos até a falha dos transportadores de correia estudados, os resultados do ajuste para o conjunto amostral dos respectivas transportadores são apresentados nas **Tabelas 4.4 a 4.6**. A realização do ajuste foi feita com o auxílio do *software* ProConf. Os valores correspondentes a t_{10} e t_{50} correspondem a quantidade de horas em que 10% e 50% das falhas ocorrem. Os parâmetros de forma (γ) e escala (θ) característicos da distribuição *Weibull* bem como a medida do tempo médio entre falhas (MTBF) e seu desvio padrão calculado a partir dessa distribuição também são apresentados.

Tabelas 4.4 (à esquerda), 4.5 (centro) e 4.6 (à direita) - Resultado dos ajustes de dados dos transportadores A1J05, A1J11 e R3J02, respectivamente (ProConf).

A1J05 Estatística	
Parâmetro	Resultado
t_{10} (h)	3,0088
t_{50} (h)	112,9853
MTBF (h)	427,26
Desvio Padrão	906,00
γ	0,5305
θ	232,2543

A1J11 Estatística	
Parâmetro	Resultado
t_{10} (h)	0,1667
t_{50} (h)	32,0054
MTBF (h)	413,21
Desvio Padrão	1571,64
γ	0,3665
θ	91,4582

R3J02 Estatística	
Parâmetro	Resultado
t_{10} (h)	4,5745
t_{50} (h)	230,882
MTBF (h)	1069,1
Desvio Padrão	2530,27
γ	0,4905
θ	503,461

Nos resultados apresentados pelas **Tabelas 4.4 a 4.6** verifica-se que o tempo médio até a ocorrência de falha por motivo incidental dos transportadores de correia A1J05, A1J11 e R3J02 são de, aproximadamente, 427 horas, 413 horas e 1069 horas, respectivamente. Isso indica que, teoricamente,

o transportador A1J11 seria a mais crítica dentre as correias estudadas por apresentar um tempo menor entre possíveis falhas de ordem incidental. No entanto, sabe-se que a modelagem dos dados do transportador A1J11 pela distribuição *Weibull* foi fundamentada na análise do método gráfico, uma vez que para os testes de aderência realizados, esta distribuição acabou sendo rejeitada, ou seja, os dados não seguiam tal distribuição. Dessa forma, assume-se que, por razão de precisão dos testes realizados, o transportador com maior criticidade dentre as estudadas até aqui foi a correia A1J05, a qual, não foi rejeitada no teste de hipóteses feito a partir dos testes de aderência.

Para proceder a análise baseada no tempo médio até a falha das correias transportadoras estudadas, faz-se importante analisar o comportamento da taxa de falha, ou risco, desses equipamentos. Uma primeira análise remete aos parâmetros de forma γ da distribuição de Weibull, os quais se relacionam com as diferentes fases observadas na curva da banheira (**Figura 2.17**). Para o ajuste de dados das correias estudadas, obteve-se valores do parâmetro de forma menores do que 1, como observado nas **Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6**. Com isso, é seguro afirmar que a fase de vida das amostras das correias corresponde a mortalidade infantil. Isso caracteriza uma taxa de falhas inicialmente alta, porém que decresce com o tempo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011).

As funções de risco $h(t)$ e de confiabilidade $R(t)$ das correias analisadas com base na modelagem pela distribuição de *Weibull* são apresentadas nas **Figuras 4.5 e 4.6**.

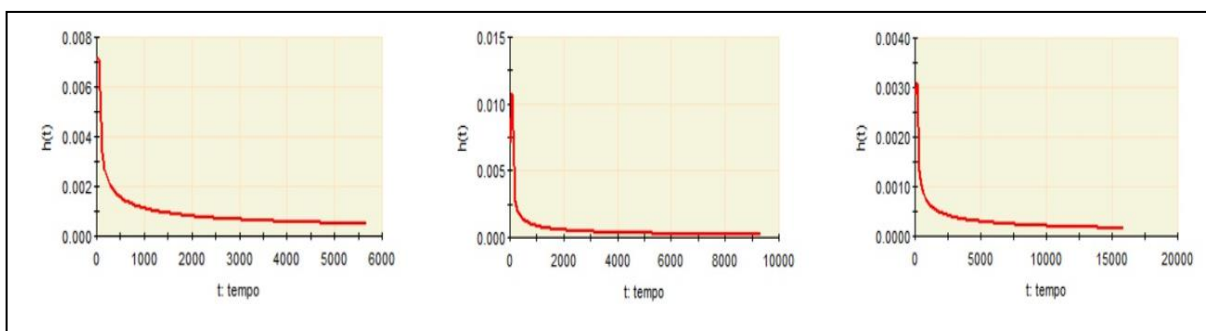


Figura 4.5 - Função de Risco $h(t)$ das correias A1J05 (à esquerda), A1J11 (centro) e R3J02 (à direita) (ProConf).

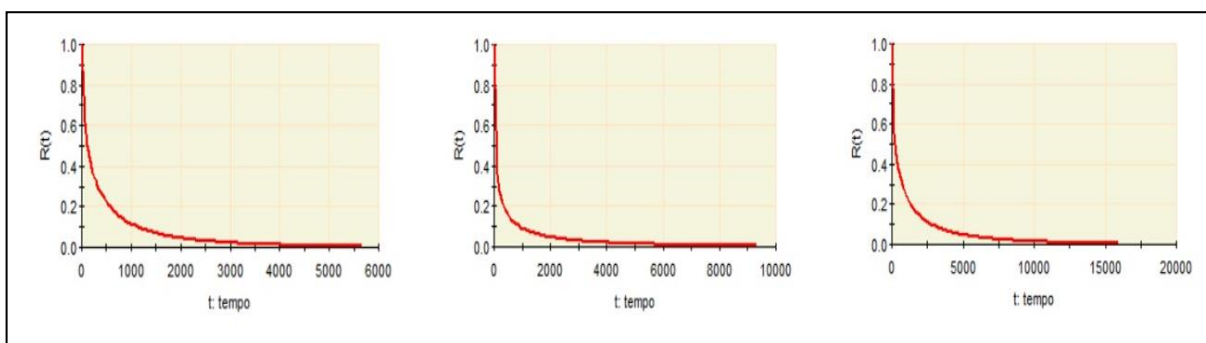


Figura 4.6 - Função de Confiabilidade $R(t)$ das correias A1J05 (à esquerda), A1J11 (centro) e R3J02 (à direita) (ProConf).

É possível confirmar por meio dos gráficos da função de risco (**Figura 4.5**) dos transportadores de correias estudadas o comportamento descrito no parágrafo anterior, o qual apresenta claramente uma

taxa de risco elevada inicialmente, mas que decai com o tempo. Esse comportamento evidencia a ocorrência de falhas prematuras, que podem ser originadas por deficiências no processo de fabricação, instalação incorreta ou materiais fora da especificação (LAFRAIA, 2001).

Já em relação aos gráficos da função de confiabilidade mostrados na **Figura 4.6**, o comportamento da curva é exatamente o esperado, apresentando sempre uma curva que decresce com o tempo, sendo que as probabilidades iniciais decaem à medida que os equipamentos são utilizados, e conseqüentemente, sofrem com o desgaste ao longo da operação.

4.2. ESTUDO DE MELHORIA DO TRANSPORTADOR DE CORREIA A1J05

Com base no estudo de Confiabilidade realizado, definiu-se que o equipamento de maior criticidade dentro do conjunto amostral analisado foi o transportador de correia A1J05. Com o intuito de melhorar a confiabilidade deste equipamento, um estudo baseado no seu histórico operacional e de manutenção é realizado. Este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de melhorias aplicáveis a este transportador, tendo como ênfase uma abordagem voltada ao seu projeto mecânico, a fim de reduzir a incidência de paradas classificadas como I2 – MANUTENÇÃO MECÂNICA, como descrito na **Tabela 3.3**.

4.2.1. BREVE DESCRIÇÃO DO TRANSPORTADOR DE CORREIA A1J05

Como descrito no **Capítulo 3**, o equipamento em estudo localiza-se no processo A1 – Britagem. Sua função é realizar o transporte de calcário resultado da operação de britadores do tipo hidrocônico, alimentando na sequência duas peneiras vibratórias. É possível observar sua posição dentro do processo na **Figura 3.1**. O transportador de correia A1J05 é ilustrado na **Figura 4.7**.



Figura 4.7. Transportador de correia AIJ05 (Arquivo pessoal)

O transportador de correia AIJ05 foi desenvolvido pela empresa Fábrica de Aço Paulista LTDA., também conhecida pela sigla FAÇO, sendo uma referência no desenvolvimento de transportadores contínuos. A Tabela 4.12 apresenta alguns dos parâmetros que caracterizam o transportador estudado, e a Figura 4.8 apresenta um esquema geral do transportador. As especificações apresentadas foram extraídas do desenho de arranjo original do transportador, o qual encontra-se no ANEXO I. É possível ainda obter algumas informações adicionais referentes ao equipamento por meio do desenho anexado. O desenho de arranjo refere-se ao equipamento original instalado em 1993. Entretanto, ao longo dos anos, o equipamento sofreu inúmeras intervenções, tendo sido modificado em relação a concepção de seu projeto original. Algumas das modificações realizadas serão citadas de maneira pontual neste relatório, a fim de corroborar com as análises das falhas ocorridas.

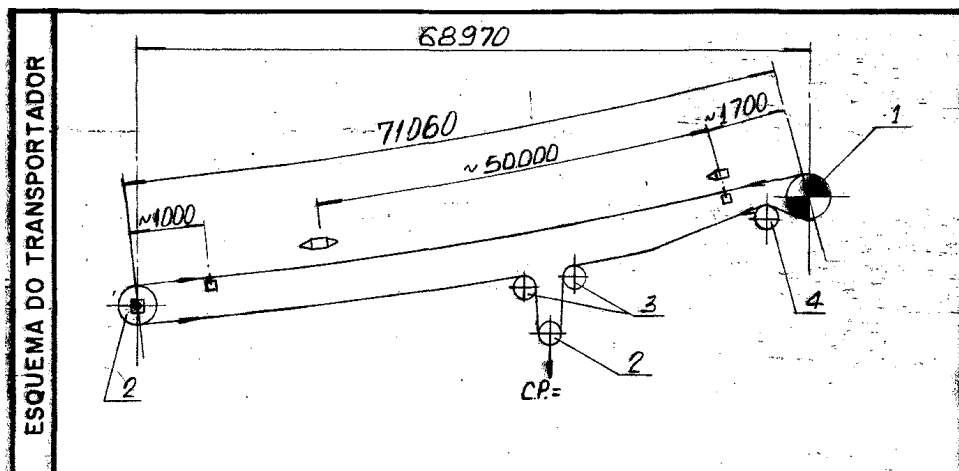


Figura 4.8 Esquema do transportador de correia AIJ05

4.2.2. HISTÓRICO DE FALHA

O estudo de melhoria do transportador de correia estudado é feito com base no histórico de falhas que levaram o equipamento a interromper sua operação por razão incidental (ver **Tabela 3.3**) ocorridas ao longo de um período de 9 anos. Justifica-se o período escolhido devido ao fato do acesso ao monitoramento em tempo real de operação da planta via sistema PI (*Plant Information*) na fábrica de cimento estudada ter ocorrido a partir do ano de 2010. Este sistema, como já mencionado no Capítulo 3, possibilita a geração de relatórios de paradas dos equipamentos, e foi a partir do mesmo que se obteve a base de dados que possibilitou a realização deste estudo.

Dessa forma, para o transportador de correia A1J05, as paradas incidentais que mais impactaram a operação do equipamento são apresentados por meio do gráfico da **Figura 4.9**.

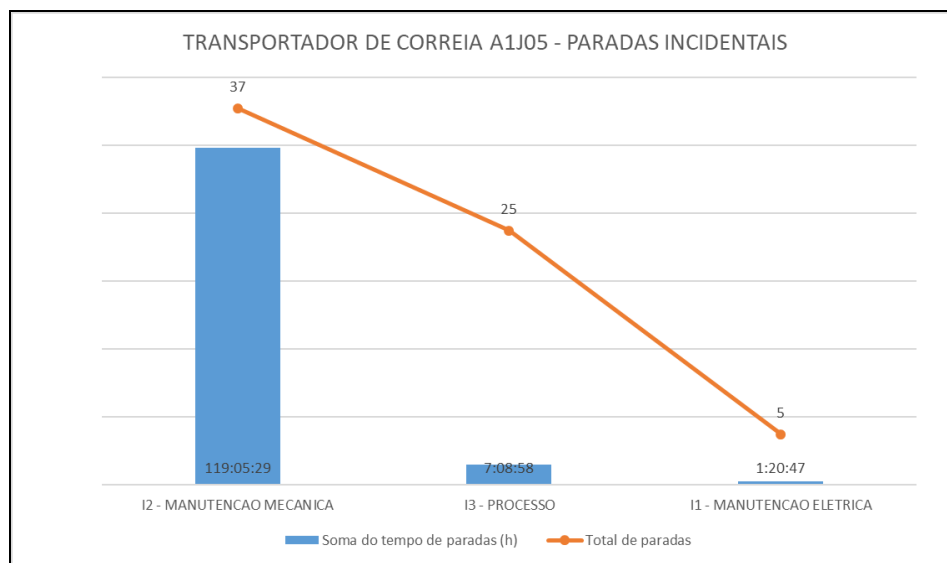


Figura 4.9 Gráfico de intensidade por frequência de paradas incidentais

No contexto geral de paradas incidentais, o gráfico da **Figura 4.8** demonstra que ao longo do período analisado, o transportador de correia A1J05 permaneceu aproximadamente 93,3% da soma do tempo de todas as paradas incidentais fora de operação devido a problemas mecânicos, enquanto que problemas relacionados a processo e problemas elétricos registraram 5,6% e 1,1% respectivamente, do tempo em que o equipamento não operou. Os dados obtidos indicam a necessidade de se analisar mais profundamente a origem das falhas de natureza mecânica que, comprovadamente, são o fator predominante para a diminuição da confiabilidade do equipamento estudado.

Dessa forma, o gráfico da **Figura 4.10** apresenta o impacto das falhas que resultaram nas paradas do transportador por problemas mecânicos em termos do percentual de tempo e número de paradas ocorridas. É possível observar a partir do gráfico que, dentre os componentes do transportador, problemas relacionados à correia transportadora são os que mais impactaram na operação do equipamento, representando 74,5% das paradas corretivas que demandaram responsabilidade do setor de manutenção. Deste percentual, rompimento parcial ou total da emenda (40,5%) e correia rasgada

(32,1%) são prioritariamente as principais falhas sofridas na correia. Dentre os demais componentes do transportador, falhas ocorridas no acoplamento hidrodinâmico VOITH, localizado entre a saída do redutor e o tambor de acionamento, representou cerca de 9% do tempo de parada total do equipamento. Falhas ocorridas nos tambores e roletes também foram registradas, com maior atenção para os problemas ocorridos nos tambores, no qual registrou-se reincidência de quebras do eixo do rolo de dobra do sistema de esticamento (9,7%).

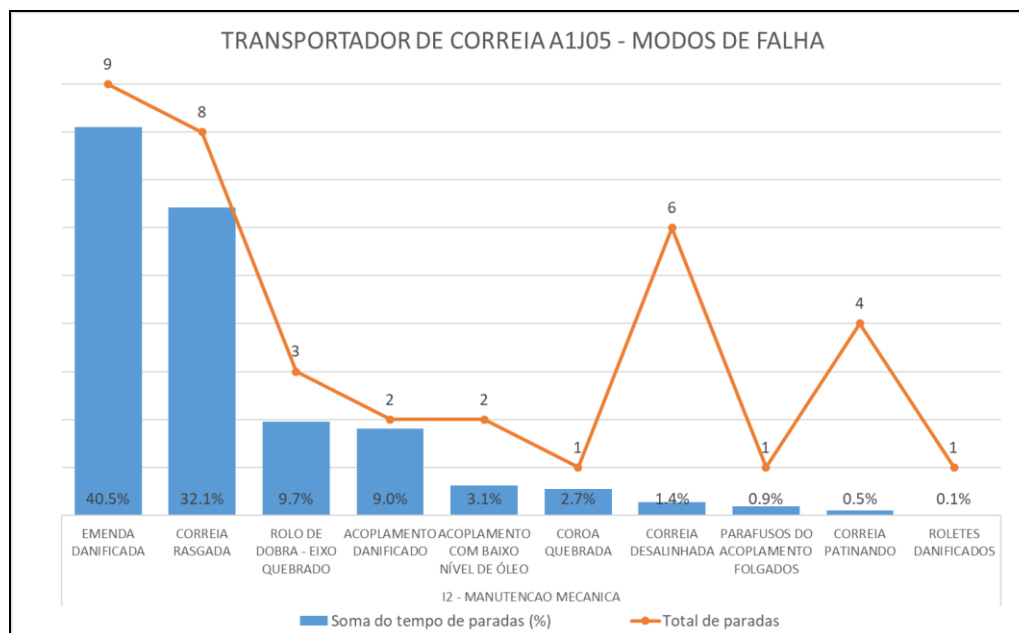


Figura 4.10 Gráfico de impacto por frequência dos modos de falha

4.2.3. ANÁLISE E ESTUDO DE MELHORIA DO TC

Na medida em que se tem conhecimento do cenário de falhas por motivo mecânico ocorridas no transportador de correia A1J05, estudos e análises de engenharia voltados para a solução dos problemas ocorridos nos componentes do equipamento foram realizados, a fim de promover um aumento na confiabilidade deste transportador, o que representa ganhos de eficiência operacional e produção para a fábrica de cimento estudada.

A abordagem das falhas ocorridas e suas análises serão apresentadas de acordo com a criticidade observada em termos do tempo de operação perdido em decorrência das falhas, e o impacto de custo no setor de manutenção para implementação das soluções propostas.

4.2.3.1. ANÁLISE APLICADA A CORREIA TRANSPORTADORA

Como apresentado no Capítulo 2, a correia transportadora é o principal componente de um transportador de correia, possibilitando o transporte de material de características diversas ao longo de um processo produtivo, como aquele utilizado neste estudo. Do conjunto de componentes que compõe

o transportador, a correia pode ser considerada o mais crítico, não somente pela função desempenhada, mas também pelo custo envolvido em atividades de manutenção relacionadas à mesma, segundo a área de planejamento e controle da manutenção (PCM) da fábrica de cimento estudada.

O fenômeno de rasgos parciais ou totais em uma correia costumam ocorrer por diversos motivos, segundo o Manual Técnico de Correias Transportadoras (MERCÚRIO, s/d). Esses motivos foram listados no Capítulo 3.

Para o caso análise das falhas do transportador de correia A1J05, de acordo com os motivos listados, seu histórico de operação e manutenção indicaram que rasgos provocados por não conformidade em componentes, desalinhamentos ou mesmo acúmulo de material no retorno da correia provocaram paradas, as quais, tiveram um impacto pouco significativo no percentual de tempo em que o equipamento permaneceu parado, conforme é visto no gráfico da **Figura 4.10**. O transportador estudado possui mesa de impacto e roletes de impacto imediatamente abaixo do chute de alimentação (**Figura 4.11**), o que diminui a possibilidade de rasgos na correia provocados pelo choque do material durante a alimentação do transportador.



Figura 4.11 Mesa de impacto do transportador A1J05 (Arquivo Pessoal)

No prosseguimento da análise, a partir de observações feitas pela equipe de inspeção quanto a condição da correia após a ocorrência da falha, identificou-se um estado de desgaste acentuado em um período curto de operação. Essa condição pode ser observada na **Figura 4.12** melhor detalhada a partir do relatório técnico emitido pela equipe de inspeção seletiva que se encontra no **ANEXO II**. Esse fato

corroborar para a análise de falha ao indicar que a causa fundamental para a reincidência de rasgos sofridos na correia do transportador A1J05 e seu significativo impacto em termos de tempo de parada, pode ser resultado de uma aplicação ou seleção incorreta do tipo de correia para o transporte de calcário, o qual é um material considerado muito abrasivo (C824, 2009). Um outro agravante para a ocorrência desta falha é a passagem de material não britável pela planta de Britagem, o que pode eventualmente provocar rasgos na correia a depender da forma como é descarregado o material no equipamento. Para esse motivo, entretanto, a instalação recente de detectores de metais na planta, em posições que antecedem a alimentação do transportador podem evitar a ocorrência de rasgos na correia ao atuar a proteção de máquinas mediante atuação dos sensores.



Figura 4.12 Desgaste da correia A1J05 (Arquivo Pessoal)

Dessa forma, o processo de análise das inúmeras condições listadas no Manual Técnico de Correias Transportadoras (MERCÚRIO, s/d) que poderiam levar ao rasgamento da correia A1J05 é resumido a partir do diagrama da **Figura 4.13**, com a indicação da causa raiz e possíveis agravantes para essa ocorrência.

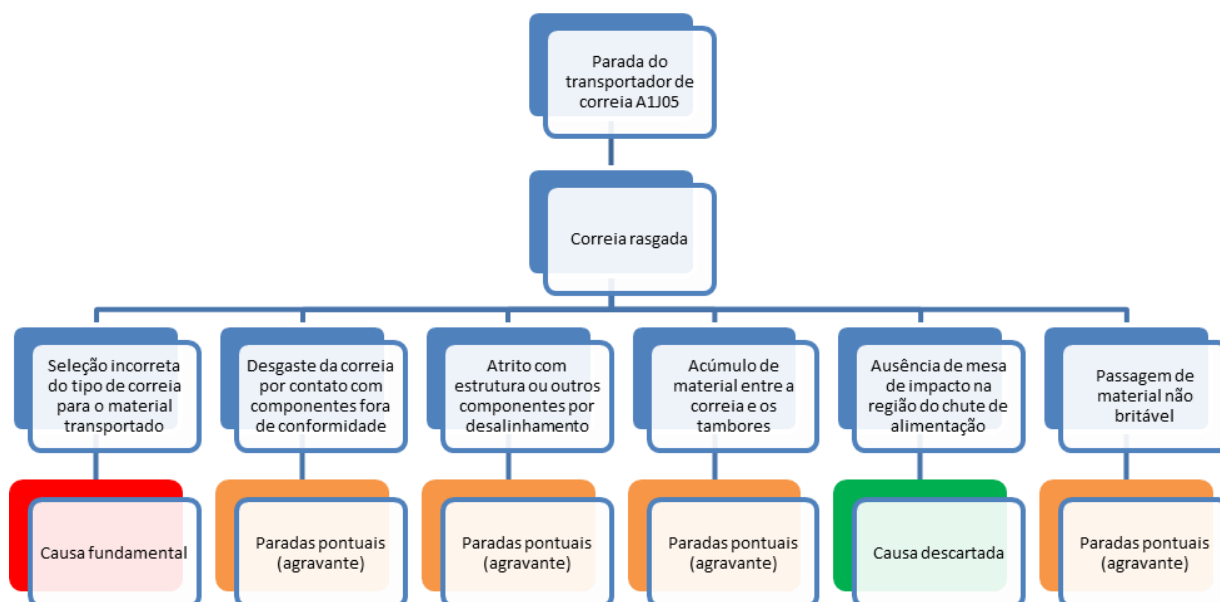


Figura 4.13 Diagrama de análise de causa

4.2.3.1.1. SELEÇÃO DE CORREIA TRANSPORTADORA

O processo de seleção de uma correia transportadora geralmente se aplica às seguintes situações (CTB, 2019):

- Substituição de uma correia transportadora já existente;
- Seleção para o projeto de um novo transportador.

Para o presente estudo aplica-se a primeira situação, e para tal caso, tem-se previamente o conhecimento a cerca de algumas das especificações técnicas que a correia possui, tal como largura, tipo e número de lonas, tensões admissível e de ruptura e a espessura e qualidade da cobertura ou revestimento. Para a atual correia instalada no transportador A1J05, tem-se as seguintes especificações apresentadas na **Tabela 4.7**

Tabela 4.7 Especificação da correia do transportador A1J05

ESPECIFICAÇÃO - CORREIA TRANSPORTADORA A1J05	
Largura (pol/mm)	48 /1219,2
Tipo de Carcaça	Poliéster/Nylon
Especificação da Correia (DIN 22102)	EP 1600/4
Tensão Admissível (N/mm)	160
Tensão de Ruptura (N/mm)	1600
Número de Lonas	4
Comprimento Desenvolvido com Emenda (mm)	148,27
Cobertura - Tipo de Aplicação	Alta Abrasão - RMA Grau II

A descrição apresentada na **Tabela 4.7** encontra-se em conformidade com a norma internacional DIN 22102 – *Conveyor Belts with Textile Piles for Bulk Goods* que padroniza a descrição do tipo de correia aplicada e suas especificações. Os fabricantes de correia, em geral, personalizam a referência utilizada, porém estabelecendo uma relação de equivalência com a especificação apresentada na norma. Tal relação pode ser observada por meio da tabela de equivalência de correias transportadoras que se encontra no **ANEXO III**. No transportador de correia A1J05, a correia transportadora que se encontrava instalada foi disponibilizada pelo fabricante de correias Goodyear com a especificação EP 420/4, a qual possui a mesma característica quanto ao tipo de carcaça apresentada na norma DIN 22102 e que pode ser visto na **Tabela 4.7**. O estabelecimento de um padrão de equivalência entre as correias de fabricantes distintos ajuda no processo de mudança do fabricante de correia utilizado, porém mantendo as características da correia para uma dada aplicação.

O procedimento de especificação da nova correia a ser aplicada no transportador A1J05 foi feito com o apoio da CORREIAS MERCÚRIO S/A, fabricante contatada pela área de PCM (Planejamento e Controle da Manutenção) para fornecimento do produto e que detém contrato com a fábrica de cimento estudada. A CORREIAS MERCÚRIO S/A é uma empresa brasileira e que se tornou referência na produção de correias, atuando em mais de 40 segmentos, sendo líder no mercado nacional e maior fabricante de correias da América Latina.

Dessa forma, com base no histórico de manutenção e operação do transportador, e levando-se em consideração algumas características importantes, tal como, o tipo de material que está sendo transportado, granulometria, resistência a impacto e desgaste, e parâmetros de projeto do transportador, a CORREIAS MERCÚRIO S/A, a partir de seu catálogo de produtos, apresentou duas opções de correia que poderiam ser devidamente escolhidas para o tipo de aplicação estudado:

- Correia com carcaça de Nylon-Nylon CT EA 4 NN 1100 10X3mm 48” Anti cut (**Figura 4.14**)

- Correia com carcaça de aramida CT EAS DPP 1600 12X4mm 48” (Figura 4.15)



Figura 4.14 Correia com carcaça de Nylon-Nylon (MERCÚRIO, s/d)

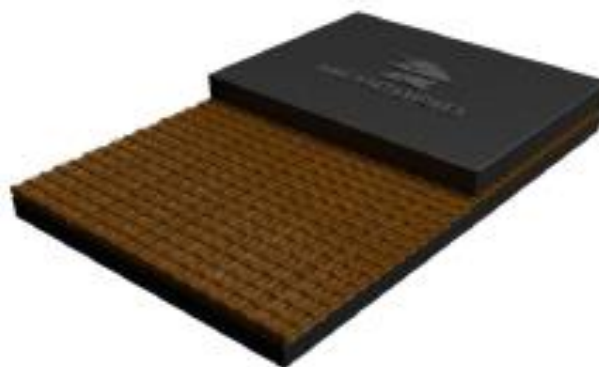


Figura 4.15 Correia com carcaça de aramida (MERCÚRIO, s/d)

As especificações das correias são apresentadas nas Tabelas 4.8 e 4.9.:

Tabela 4.8 Especificação correia NN (MERCÚRIO, s/d)

CT EA 4 NN 1100 48" Anti-Cut MERCÚRIO	
ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	
Tipo de Carcaça (MERCÚRIO)	4 NN 1100
Urdume	Nylon
Trama	Nylon
Especificação (norma DIN 22.102)	PP 1000/4
Tensão Admissível da Carcaça (N/mm)	176
Tensão de Ruptura da Carcaça (N/mm)	1760
Número de Lonas	4
Peso total (kg/m)	28,14 (4 PN 4000)
Tipo de Cobertura (MERCÚRIO)	EA
Tipo de Cobertura (DIN 22.102)	X
Cobertura- Tipo de Aplicação	Extra Abrasão - RMA Grau I
Cobertura - Temperatura (°C)	≤80

Tabela 4.9 Especificação correia de aramida (MERCÚRIO, s/d)

CT EAS DPP 1600 48" MERCÚRIO	
ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	
Tipo de Carcaça (MERCÚRIO)	DPP 1600
Urdume	Aramida
Trama	Nylon
Especificação (norma DIN 22.102)	-
Tensão Admissível da Carcaça (N/mm)	160
Tensão de Ruptura da Carcaça (N/mm)	1600
Número de Lonas	1
Peso total (kg/m)	26,65
Tipo de Cobertura (MERCÚRIO)	EAS
Tipo de Cobertura (DIN 22.102)	W
Cobertura- Tipo de Aplicação	Extra Abrasão - RMA Grau I
Cobertura - Temperatura (°C)	≤80

Algumas das propriedades das correias, de acordo com catálogo da CORREIAS MERCÚRIO S/A são:

- Correia com carcaça de Nylon-Nylon CT EA 4NN1100 10X3mm 48” Anti cut

- Alta resistência a tensões e flexões;
 - Esticamento adequado;
 - Excelente acamamento;
 - Alta resistência à emenda mecânica;
 - Resistência a altas temperaturas;
 - Resistência ao desgaste;
 - Excelente capacidade de absorção de impactos;
- Correia com carcaça de aramida CT EAS DPP 1600 12X4mm 48”
 - Lona de aramida mais forte, leve e resistente que o aço;
 - Propriedades únicas de resistência a tensão e peso;
 - Baixo alongamento;
 - Alta resistência e flexibilidade;
 - Indicada para aplicações externas;
 - Eficiente contra rasgos e rupturas;
 - Alta absorção de impacto;
 - Mais leve quando comparada com outras correias.

Diante da possibilidade de aplicação de ambas as correias apresentadas pela CORREIAS MERCÚRIO S/A, decidiu-se por utilizar uma matriz de decisão (SEBRAE, s/d) para auxiliar no processo de análise e seleção da correia a ser implementada no transportador A1J05. Para essa avaliação, levou-se em conta requisitos como: resistência a rasgos, resistência ao impacto, peso, custo de manutenção e resistência a abrasão. Para cada critério foi atribuído um peso, o qual denota a importância de cada um em relação a ocorrência da falha e sua relevância para a área de manutenção. As notas atribuídas foram de 1 a 5, sendo a maior nota aquela que representa a melhor alternativa dentre as opções analisadas. A **Tabela 4.10** apresenta a matriz de decisão para seleção do tipo de correia a ser implementado.

Tabela 4.10 Matriz de decisão

Tipo de correias	Critérios					Total
	Resistência a rasgos (PESO: 5)	Resistência ao impacto (PESO: 4)	Custo de manutenção (PESO: 3)	Peso da correia (PESO: 2)	Resistência a abrasão (PESO: 1)	
CT EA 4 NN 1100 Anti-Cut	3	3	3	4	5	52
CT EAS DPP 1600	5	4	4	5	4	64

Para a análise de alguns dos critérios avaliados na matriz de decisão, seria necessário a realização de uma série de ensaios para a verificação de conformidades da correia com as especificações que devem obedecer. Esses ensaios contemplam testes de características dimensionais, físicas, químicas, tribológicas e funcionais das correias (CTB, 2019). A partir disso, tem-se mensurado parâmetros como resistência da correia transportadora ao rasgo, resistência ao desgaste dos revestimentos, tensão de ruptura dos revestimentos, módulo de elasticidade, entre outros. Devido a impossibilidade de realização destes testes nas instalações da fábrica, bem como a falta de *know-how* para fazê-lo, as informações quanto as propriedades e parâmetros físicos das correias foram disponibilizados pela fabricante das correias, o qual, detém o conhecimento em relação as características intrínsecas de seus produtos. Coube ao presente estudo, com o apoio do setor de manutenção, auxiliar no processo de seleção da correia a ser implementada no transportador A1J05.

A avaliação e atribuição de pesos aos critérios se deu com base em uma análise individual de cada um deles. A resistência a rasgos e a impacto apresentadas pelas correias foram os critérios de maior peso, com 5 e 4 respectivamente. Isso se justifica pelo fato de o problema abordado ser justamente a parada do transportador por motivo de rasgamento parcial ou total da correia, e a resistência ao impacto do material na alimentação do transportador é um dos fatores de maior influência para diminuição da vida útil deste componente. Neste aspecto, a correia CT EAS DPP 1600 teve maior nota em ambos os critérios devido ao fato da lona de aramida possuir características superiores a lona de nylon-nylon. Ela apresenta uma elevada resistência, chegando a suportar 5 vezes mais esforços do que o aço, o qual é utilizado em alguns tipos de correia para aumentar a resistência ao impacto.

Na avaliação do critério de custo de manutenção, a análise levou em consideração o custo relativo a cada uma das correias por metro, incluindo-se valores de impostos, valor estimado para realização de emenda a quente e estimativa do tempo de vida útil em meses que cada correia leva com base em experiência prévia que a fabricante possui com aplicações similares para ambas as correias. A **Tabela 4.11** apresenta a avaliação de custo das correias.

Tabela 4.11 Análise do critério de custo das correias

Descrição das correias	Quantidade (m)	Valor c/ PIS e CONFINS	Valor estimado de emenda a quente	Tempo de vida útil (meses)	Número de trocas da correia	Valor total
CT EA 4 NN 1100 Anti-cut	165	R\$ 617.13	R\$ 30,000.00	4	6.75	R\$ 889,808.54
CT EAS DPP 1600		R\$ 882.49	R\$ 45,000.00	27	0	R\$ 190,610.85

Com base na **Tabela 4.11**, observa-se que, excluindo-se a projeção de tempo de vida útil das correias, a CT EA 4 NN 1100 Anti-Cut apresentaria um custo de R\$ 131.826,45, inferior aos R\$ 190.610,85 da CT EAS DPP 1600, levando a conclusão de que a primeira seria mais vantajosa de se

investir, o que a faria ter uma melhor avaliação neste critério. No entanto, a projeção do tempo de vida útil da correia, e o conseqüente número de trocas ocorridas dentro do período no qual é necessária a troca da correia de maior durabilidade, torna-se uma variável importante e necessária para a área de planejamento e controle da manutenção (PCM), a qual realiza o controle de gastos com base no orçamento disponível para o setor de manutenção. Com isso, tem-se um aumento do custo estimado da correia CT EA 4 NN 1100 Anti-Cut para R\$ 889.808,54, visto que no período de 27 meses, quando ocorre a primeira troca da correia CT EAS DPP 1600, foram realizadas aproximadamente 7 trocas da correia, levando-a um tempo de vida útil estimado de somente 4 meses de operação. O valor da correia CT EAS DPP 1600 representa uma economia de 79% em relação ao valor da correia CT EA 4 NN 1100 Anti-Cut, ou um valor de R\$ 699.217,69. Logo, avaliou-se a correia de aramida com uma nota superior no critério de custo de manutenção.

Em relação ao critério de peso, para um comprimento da correia de 165 metros, a correia CT EAS DPP 1600 possui um peso total de 26,65 Kg/m, enquanto que a correia CT EA 4 NN 1100 Anti-Cut possui 28,14 Kg/m, como observado por meio das **Tabelas 4.8 e 4.9**. Um fator que contribui para tal diferença se deve a característica da lona de aramida, que faz com que seja possível aumentar a espessura das coberturas superior e inferior da correia, uma vez que só se utiliza uma lona neste caso, em detrimento da correia CT EA 4 NN 1100 Anti-Cut, que possui 4 lonas em sua estrutura. Com isso, se consegue uma correia mais leve na comparação direta. O peso mais baixo da correia de aramida implica na redução de custos de projeto e no consumo de energia do transportador. Dessa forma, a correia de aramida registrou maior nota nesta avaliação.

Para a avaliação da resistência à abrasão, a qual é uma propriedade importante devido a característica do calcário (material muito abrasivo), a correia CT EA 4 NN 1100 Anti-Cut obteve uma avaliação superior devido ao tipo de cobertura aplicada, a EA ou Extra Abrasão, nomenclatura utilizada pela CORREIAS MERCÚRIO S/A. Na correia de aramida foi aplicada uma cobertura do tipo EAS, ou Extra Abrasão Super, que apesar de possuir resistência inferior a correia de 4 lonas, ainda sim possui bom valor de resistência quanto a este critério, perdendo na comparação. A **Figura 4.16** ilustra a diferença de valores entre as coberturas das correias analisadas. Devido a esta diferença, a correia CT EA 4 NN 1100 Anti-Cut obteve maior nota neste critério.



Figura 4.16 Resistência a abrasão da cobertura das correias Mercúrio

Dessa forma, como resultado da matriz de decisão apresentada na **Tabela 4.10**, decidiu-se por implementar a correia de lona de aramida CT EAS DPP 1600 a fim de diminuir a ocorrência de paradas do transportador A1J05 devido a rasgos na correia. As **Figuras 4.17 a 4.19** trazem o momento de instalação da correia no transportador.



Figura 4.17 Instalação da correia de aramida (Arquivo Pessoal)



Figura 4.18 Instalação da correia de aramida (Arquivo Pessoal)



Figura 4.19 Instalação da correia de aramida (Arquivo Pessoal)

4.2.3.1.2. CÁLCULO DO TRANSPORTADOR DE CORREIA

Com a instalação da correia de aramida no transportador A1J05, uma análise do equipamento foi realizada a fim de se identificar possíveis mudanças a serem feitas em relação ao projeto original, visando garantir uma condição ótima de operação do transportador com a nova correia.

Para isso, aplicou-se inicialmente a metodologia de dimensionamento prevista no “MANUAL DE TRANSPORTADORES DE CORREIA FAÇO, 1996” para calcular analiticamente parâmetros relevantes para a operação do transportador e avaliar a necessidade de realizar redimensionamentos de componentes do equipamento em área. O manual FAÇO (1996) segue as normas brasileiras relativas ao projeto de transportadores de correia para produtos à granel e apresenta as etapas a serem seguidas de forma concisa e intuitiva. Nesse aspecto, as recomendações da fabricante da correia são de grande importância, uma vez que, de acordo com o tipo de correia aplicada, se faz necessário readequar componentes importantes do transportador para garantir uma condição de trabalho ideal da correia e as partes que a compõe, corroborando com a manutenção de sua vida útil prevista em projeto. Ao adotar o manual FAÇO (1996) assume-se um dimensionamento bastante conservador quanto aos cálculos realizados, ao mesmo tempo em se garante certa segurança quanto a critérios de falha.

- **Parâmetros do transportador de correia A1J05**

A **Tabela 4.12**, apresenta os parâmetros iniciais mais importantes para o cálculo de transportadores. Os valores apresentados para os parâmetros do transportador foram extraídos do desenho de arranjo do transportador que se encontra no **ANEXO I**. Uma vez que somente a correia transportadora aplicada foi alterada, porém mantendo-se suas dimensões, os valores referentes a esses parâmetros não sofreram alteração. A referência das fórmulas e tabelas do manual da FAÇO (1996) necessárias para o cálculo de parâmetros como capacidade de transporte do transportador, por exemplo, é apresentado na planilha de cálculo desenvolvida para o estudo do transportador A1J05 no **Apêndice A**. Os cálculos e seleção dos valores desses parâmetros, por mais que não fossem necessários, foram realizados somente a efeito de verificação.

Tabela 4.12 Especificações do Transportador A1J05

Características do Transportador A1J05	
Capacidade de transporte de projeto	1300t/h
Capacidade de transporte nominal	1100t/h
Material transportado	Calcário
Granulometria	300mm
Peso específico	1,45t/m ³
Velocidade de operação	2m/s
Altura do transportador	17m
Comprimento entre tambores	71,06m
Temperatura de operação	25 °C
Inclinação entre roletes	35°
Número de roletes por cavalete	3

- **Seleção da Série de Roletes**

Com a nova correia aplicada, foi necessário verificar se o conjunto de roletes presentes no transportador estava adequado para operação, uma vez que o peso da correia é fator importante nos cálculos para seleção dos roletes do transportador.

Para seleção de roletes deve-se calcular o fator de aplicação, que é dado pela **Eq. 4.1**:

$$C = A \cdot B \quad (4.1)$$

Em que:

A - Tipo de serviço [**Figura 4.20**];

B - Característica do material [**Figura 4.21**];

A seleção ocorre mediante as tabelas abaixo de acordo com as características de operação envolvidas no projeto.

Regime de Trabalho h/dia	Tipo de Instalação	Peso do Material t/m ³	Fator A
até 6	Operação intermitente	< 1,6	6
6 a 9	Instalação provisória	< 1,6	6
6 a 9	Todas instalações	1,6 a 1,8	12
6 a 9	Todas instalações	> 1,8	15
10 a 16	Todas instalações	< 1,6	15
10 a 16	Todas instalações	1,6 a 1,8	12
10 a 16	Todas instalações	> 1,8	15
16 a 24	Todas instalações	—	15

Figura 4.20 Fator A (FAÇO, 1996)

Tamanho Máx. de Pedacos (pol)	Peso do material t/m ³						
	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2
4"	24	36	48	60	72	84	96
6"	32	48	64	80	96	112	128
8"	40	60	80	100	120	140	160
10"	48	72	96	120	144	168	192
12"	56	84	112	140	168	196	224
14"	64	96	128	160	192	224	256
16"	72	108	144	180	216	252	288
18"	80	120	160	200	240	280	320

Figura 4.21 Fator B (FAÇO, 1996)

A seleção do valor para o fator B foi feito com base na interpolação dos valores entre o peso específico de 1,2 t/m³ e 1,6 t/m³ para uma granulometria aproximada de 12", resultando em um fator B igual a 101,5.

Com os valores selecionados para os fatores A e B, é possível calcular o valor do fator de aplicação através da Eq. 4.1. Assim, tem-se que:

$$C = 1522,5$$

Com o valor calculado, é possível determinar a série de roletes para o projeto, conforme o gráfico da Figura 4.22.

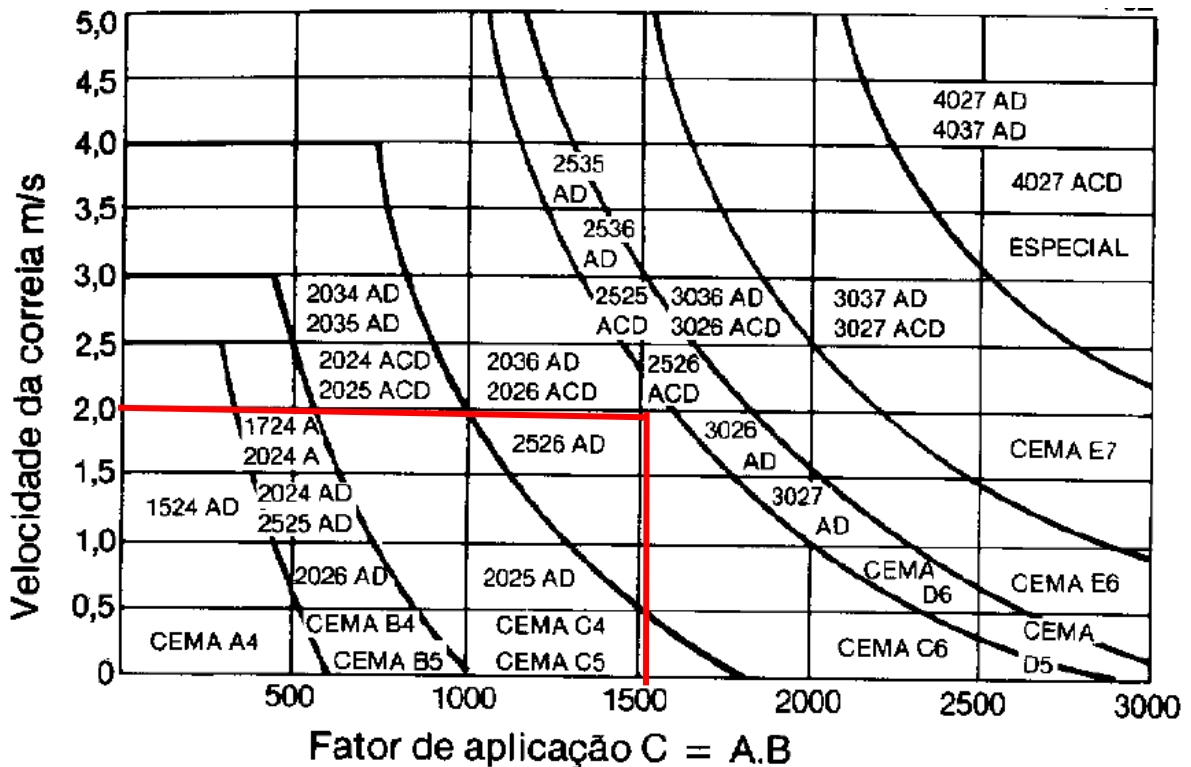
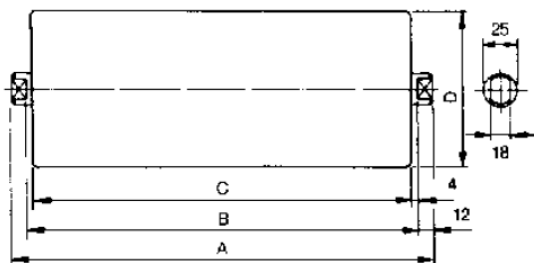


Figura 4.22 Seleção de série de roletes (FAÇO, 1996)

Pelo gráfico da **Figura 4.22**, de acordo com a velocidade do transportador e o fator de aplicação C, a série de roletes escolhida para a composição do transportador de correia foi o 2526 AD. A série de roletes selecionadas a partir do manual FAÇO (1996) com base na especificação selecionada é apresentada nas **Figuras 4.23 a 4.26** para os roletes de carga, retorno e impacto, bem como para o conjunto de roletes no cavalete.

ROLO DE CARGA

2525-AD **2526-AD** 2535-AD
 2525-ACD 2526-ACD 2536-AD

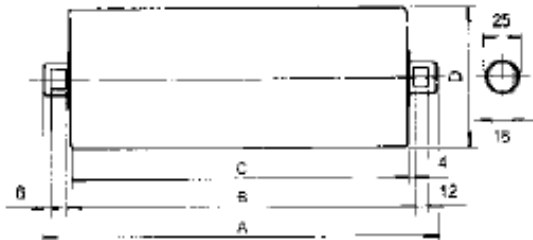


Largura da correia	Dimensões (mm)						Peso (kgf)	
	A	B	C	D		2525 2535	2526 2536	
				2525 2535	2526 2536			
24"	260	236	228	127	152	6,0	6,9	
30"	312	288	280	127	152	6,9	7,9	
36"	364	340	332	127	152	7,8	8,9	
42"	417	393	385	127	152	8,7	9,9	
48"	470	446	438	127	152	9,6	11,0	
54"	523	499	491	127	152	10,5	12,0	
60"	576	552	544	127	152	11,3	13,0	
72"	684	660	652	127	152	13,2	15,1	

Figura 4.23 Rolo de Carga (FAÇO, 1996)

ROLO DE RETORNO PLANO

2525-AD **2526-AD** 2535-AD
 2525-ACD 2526-ACD 2536-AD

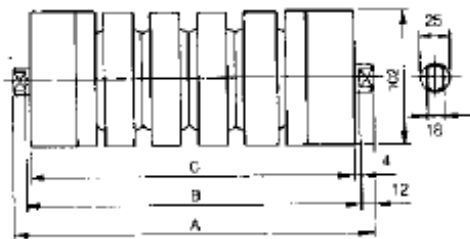


Largura da correia	Dimensões (mm)					Peso (kgf)	
	A	B	C	D		2525 2535	2526 2536
				2525 2535	2526 2536		
24"	729	693	685	127	152	13,8	15,8
30"	881	845	837	127	152	16,3	18,7
36"	1034	998	990	127	152	18,9	21,7
42"	1186	1150	1142	127	152	21,4	24,7
48"	1339	1303	1295	127	152	24,0	27,6
54"	1491	1455	1447	—	152	28,8	33,0
60"	1643	1607	1599	—	152	31,7	36,1
72"	1947	1911	1903	—	152	37,9	42,4

Figura 4.24 Rolo de retorno (FAÇO, 1996)

ROLO DE IMPACTO

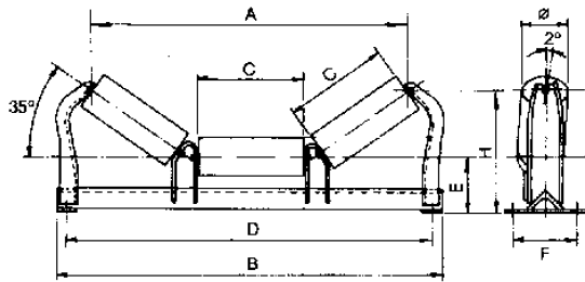
2525-AD **2526-AD** 2535-AD
 2525-ACD 2526-ACD 2536-AD



Largura da correia	Dimensões (mm)					Peso (kgf)	
	A	B	C	D		2525 2535	2526 2536
				2525 2535	2526 2536		
24"	260	236	228	127	152	5,6	6,9
30"	312	288	280	127	152	6,7	8,0
36"	364	340	332	127	152	7,5	9,2
42"	417	393	385	127	152	8,3	10,3
48"	470	446	438	127	152	9,4	11,5
54"	523	499	491	127	152	10,2	12,6
60"	576	552	544	127	152	11,1	13,8
72"	684	660	662	127	152	13,1	16,1

Figura 4.25 Rolo de impacto (FAÇO, 1996)

ROLETE DE CARGA 35° (PARAFUSADO)



2525-AD **2526-AD** 2535-AD
 2525-ACD 2526-ACD 2536-AD

Largura da correia	Dimensões (mm)										Peso (kgf)	
	A		B	C	D	E		F	H		2525 2535	2526 2536
	2525 2535	2526 2536				2525 2535	2526 2536		2525 2535	2526 2536		
24"	716	908	228	838	153	200	303	30,1	32,8			
30"	854	1061	280	991	153	200	333	34,0	37,0			
36"	991	1214	332	1144	161	200	371	39,2	42,5			
42"	1131	1365	385	1295	163	200	403	48,2	51,8			
48"	1270	1518	438	1448	163	200	434	55,7	59,9			
54"	1410	1670	491	1600	181	200	482	66,9	71,4			
60"	1550	1823	544	1753	181	200	512	71,9	77,0			
72"	1814	2127	652	2057	199	200	588	91,2	96,9			

Figura 4.26 Conjunto de roletes (FAÇO, 1996)

Ao selecionar a série de roletes a ser aplicada no transportador A1J05 com base no resultado obtido na Eq.4.1 e no gráfico da Figura 4.22, verifica-se a série de roletes presente no transportador, a fim de definir se os roletes instalados no equipamento estão em conformidade com o definido em projeto. Pelo desenho de arranjo do transportador encontrado no ANEXO I é possível observar que os roletes instalados são exatamente da série 2526 AD, conforme mostrado também na tabela da Figura 4.27, extraída do desenho. Com isso, conclui-se que, com a instalação da nova correia, não é necessário realizar a substituição dos roletes, podendo-se manter os atuais que se encontram no transportador.

ROLETES	SIMB.	SÉRIE <u>2526-AD</u>	α	QTDE
		CARGA	35°	63
		IMPACTO	35°	2
		A. A. CARGA	35°	2
		TRANSIÇÃO	20°	2
		RETORNO	0°	19
		A. A. RETORNO	0°	2

Figura 4.27 Roletes instalados na A1J05 (FAÇO, 1996)

• CÁLCULO DA FORÇA RADIAL

Após a escolha dos roletes, uma verificação é feita, além dos cálculos dos esforços feitos sobre os rolamentos. Com isso, calcula-se a força radial que atua nos rolamentos, mediante a **Eq. 4.2**:

$$F_r = \left(\frac{j}{2} + \frac{1-j}{2} \text{sen}^2 \beta \right) * W_m * a + W_b * \frac{a}{6} + \frac{W_r}{2} \quad (4.2)$$

Em que:

F_r : força radial [kgf];

β : inclinação dos rolos [graus];

j : fator indicativo do material sobre o rolo central (**Figura 4.28**);

W_m : é o peso do material na correia [kgf/m];

W_b : peso da correia [kgf/m];

W_r : o peso do rolo [kgf/m], (**Figura 4.29**);

a : espaçamento dos roletes de carga [m].

β	0°	20°	35°	45°
j	1,00	0,56	0,60	0,64

Figura 4.28 Fator j (FAÇO, 1996)

Largura da correia	16"	20"	24"	30"	36"	42"	48"	54"	60"	66"	72"	84"
Peso de 1 rolo (kgf)	4,6	5,0	4,3	5,0	8,1	9,1	10,1	13,0	14,0	19,7	23,0	29,7

Figura 4.29 Peso do rolo (FAÇO, 1996)

O peso do material é calculado a partir de:

$$W_m = 0,277 \frac{Q}{V} \quad (4.3)$$

Em que:

W_m : Peso do material [kgf/m];

Q : Capacidade do transportador [t/h];

V : Velocidade da correia [m/s].

Para o transportador A1J05 tem-se, conforme **Tabela 4.12**:

$$Q = 1300 \text{ t/h}$$

$$V = 2 \text{ m/s}$$

Logo, temos que:

$$W_m = 180,05 \text{ kgf/m}$$

Em relação ao peso da correia, a partir da especificação técnica disponibilizada pela fabricante CORREIAS MERCÚRIO S/A, como observado na **Tabela 4.9**, tem-se que:

$$W_b = 26,65 \text{ kgf/m}$$

Assim, tem-se os valores para cada termo da **Eq. (4.2)**, conforme mostra a **Tabela 4.13**.

Tabela 4.13 Resultados

j	β	a	W_m	W_b	W_r	Fr
0,6	35°	1	180,05	26,65	10,01	75,3

• CÁLCULO DA CARGA DINÂMICA NOS ROLAMENTOS

Após se calcular o valor da força radial, é determinada a carga dinâmica sobre os rolamentos. Para isso, considera-se uma vida útil teórica de 20000 h-serviço intermitente. Para o cálculo da carga dinâmica, tem-se pela **Eq 4.4**:

$$C_d = F_r * S_r \quad (4.4)$$

Em que:

C_d : carga dinâmica [kgf];

F_r : força no rolete [kgf];

S_r : fator de segurança do rolamento.

A **Figura 4.30** mostra as séries de roletes com seus respectivos rolamentos. Então, tem-se que os rolamentos aplicados para a série de roletes 2526 AD selecionada anteriormente foram os rolamentos de esfera 6502.

Rolamentos	C_d (máx) (kgf)	Série dos Roletes	Carga máx. no eixo (kgf) $p/\ d = 800 \text{ kgf/cm}^2$
6202	795	1524 AD	240
6203	975	1724 A	260
6204	1295	2024 A - 2024 AD - 2025 AD - 2026 AD	280
6304	1622	2034 AD - 2035 AD - 2036 AD	280
30204	2653	2024 ACD - 2025 ACD - 2026 ACD	280
6205	1428	2525 AD - 2526 AD	580
6305	2295	2535 AD - 2536 AD	580
30205	2978	2525 ACD - 2526 ACD	580
6206	1989	3026 AD - 3027 AD	940
6306	2867	3036 AD - 3037 AD	940
30206	3876	3026 ACD - 3027 ACD	940
6208	3132	4027 AD	2260
6308	4183	4037 AD	2260
30208	5948	4027 ACD	2260

Figura 4.30 - Série de roletes e seus respectivos rolamentos (FAÇO, 1996)

rpm	Vida útil (h)							
	de esferas				cônicos			
	20.000	30.000	40.000	50.000	20.000	30.000	40.000	50.000
25	3,11	3,55	3,91	4,23	2,78	3,13	3,42	3,66
40	3,63	4,14	4,56	4,93	3,19	3,59	3,92	4,20
63	4,23	4,82	5,32	5,75	3,66	4,12	4,50	4,82
100	4,93	5,63	6,20	6,70	4,20	4,73	5,17	5,54
125	5,32	6,07	6,70	7,23	4,50	5,07	5,54	5,94
160	5,75	6,56	7,23	7,81	4,82	5,43	5,94	6,36
200	6,20	7,08	7,81	8,43	5,17	5,83	6,36	6,81
250	6,70	7,64	8,43	9,11	5,54	6,24	6,81	7,30
320	7,23	8,25	9,11	9,83	5,94	6,68	7,30	7,82
400	7,81	8,91	9,83	10,6	6,36	7,16	7,82	8,38
500	8,43	9,62	10,6	11,5	6,81	7,67	8,38	8,98
630	9,11	10,38	11,5	12,4	7,30	8,22	8,98	9,62
800	9,83	11,24	12,4	13,4	7,82	8,81	9,62	10,3
1000	10,6	12,14	13,4	14,5	8,38	9,43	10,3	11,0
1250	11,5	13,11	14,5	15,6	8,98	10,1	11,0	11,8

Figura 4.31 - Fatores de segurança dos rolamentos (Sr) (FAÇO, 1996)

Logo, a partir da **Figura 4.31**, sabendo que os rolamentos utilizados são o 6205 de esferas, e que a rotação de saída no eixo do tambor é de aproximadamente 100 rpm (o valor real de rotação é 76,6 rpm, porém, para efeito do dimensionamento feito, aproxima-se para 100 rpm, facilitando a seleção do valor na **Figura 4.31** e optando pela segurança) tem-se que o fator de segurança, Sr, é igual a 4,93 para uma vida útil de 20000 h. Com isso, o valor da carga dinâmica nos rolamentos é dada pela **Eq. 4.5**:

$$C_d = 75,3 * 4,93 = 371,27 \text{ kgf} \quad (4.5)$$

A carga dinâmica encontrada está bem abaixo da carga de 1428 kgf para C_d que o rolamento suporta e da carga suportada pelo eixo, que é de 580 kgf. Os resultados apresentados asseguram as escolhas da série de roletes e dos rolamentos feitas anteriormente.

• ESPAÇAMENTO ENTRE ROLETES E FLECHA DA CORREIA

A verificação quanto ao espaçamento entre roletes deve ser feita tanto para as partes superiores quanto para as partes inferiores (retorno) do transportador de correia (FAÇO. 1996). A ilustração trazida pela **Figura 4.32** demonstra os espaçamentos a e b , respectivamente, distância entre roletes de carga e roletes de retorno.

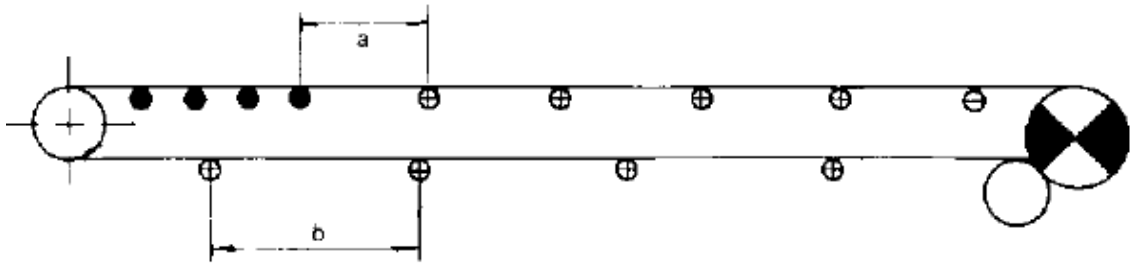


Figura 4.32 Esquema de transportador (FAÇO, 1996)

Largura da Correia (B)	Espaçamento A dos Roletes de Carga			Espaçamento B dos Roletes de Retorno
	Peso Específico do Material (t/m ³)			
	0,8	1,6	2,4	
16"	1,50 m	1,50 m	1,35 m	3,0 m
20"	1,50 m	1,20 m	1,20 m	
24"	1,35 m	1,20 m	1,20 m	
30"	1,35 m	1,20 m	1,20 m	
36"	1,35 m	1,20 m	1,05 m	
42"	1,35 m	1,00 m	0,90 m	
54"	1,20 m	1,00 m	0,90 m	
60"	1,20 m	1,00 m	0,90 m	
72"	1,20 m	0,90 m	0,90 m	
84"	1,00 m	0,75 m	0,75 m	
96"	1,00 m	0,75 m	0,60 m	

Figura 4.33 Espaçamento entre roletes (FAÇO, 1996)

De acordo com a tabela da **Figura 4.33**, para uma correia com largura de 48", com peso específico do material de 1,45t/m³ aproxima-se o valor do espaçamento entre os roletes de carga para 1m, e 3m para os roletes de retorno. Em medidas realizadas no transportador A1J05, verificou-se que a distância entre os roletes de carga e retorno foram exatamente as mesmas das selecionadas a partir da **Figura 4.33**. Dessa forma, manteve-se o espaçamento entre os roletes no equipamento.

Com o espaçamento entre os roletes de carga determinado, calcula-se a flecha máxima, que é um fator importante na análise de tensões envolvidas. A flecha entre dois roletes é dada pela **Eq 4.6**:

$$f = (W_m + W_b) \cdot \frac{a^2}{8 \cdot T_0} \quad (4.6)$$

Em que:

f : flecha [m];

T_0 : tensão que garante uma flecha mínima entre os roletes [kgf];

W_m : peso do material a ser transportado [kgf/m];

W_b : peso da correia [kgf/m];

a : espaçamento dos roletes de carga [m].

O manual FAÇO (1996) recomenda-se uma flecha máxima em torno de 2%.

De acordo com os valores já obtidos até aqui, apresentam-se os valores correspondentes aos parâmetros necessários para o cálculo da flecha e tensão mínima na correia T_0 por meio da **Tabela 4.14**.

Tabela 4.14 Resultados para tensão mínima T_0

T_0 [kgf]	W_m [kgf/m]	W_b [kgf/m]	a [m]
1291,9	180,05	26,65	1

• CÁLCULO DA POTÊNCIA DE ACIONAMENTO

O cálculo da potência de acionamento se faz importante para verificar a necessidade de repontecializar o sistema, e com isso, dimensionar e selecionar os componentes que o compõe, como motor elétrico, redutor e freio contra-réculo.

O acionamento do transportador de correia A1J05 é feito por um único tambor (acionamento simples). O manual FAÇO apresenta dois métodos possíveis para o cálculo da potência do transportador: o método prático e o método CEMA. O método prático apresenta uma metodologia mais simplificada, aplicada para transportadores mais simples, com até 100 metros de comprimento e pequena capacidade de transporte. Neste método, calcula-se a potência necessária para o transporte primeiramente, determinando em seguida, as tensões na correia. O método CEMA, no entanto, é um método mais sofisticado, aplicável para transportadores com vários lances, curtos ou longos, em que as tensões são calculadas primeiramente, sendo a potência calculada na sequência (FAÇO, 1996). Devido as características do transportador A1J05, o método prático pode ser aplicado sem comprometer a qualidade do resultado.

Por meio do método prático, a potência de acionamento do transportador pode ser calculada por meio da **Eq. 4.7**:

$$N_e = V \cdot (N_v + N_g) + (N_1 \pm N_h) \cdot \frac{Q}{100} \quad (4.7)$$

Em que:

N_e : Potência total efetiva [HP];

N_v : Potência para acionar o transportador vazio a uma velocidade de 1 m/s [HP];

N_g : Potência para vencer o atrito das guias laterais à velocidade de 1 m/s. (Caso o comprimento seja normal $N_g = 0$) [HP];

N_1 : Potência para deslocar 100t/h de uma distância L na horizontal [HP];

N_h : Potência para elevar ou descer 100 t/h de material de uma altura H [HP].

O manual FAÇO (1996) determina que os valores para as potências N_v , N_1 , N_g e N_h devem ser selecionados por meios das tabelas das Figuras 4.34 a 4.37, respectivamente.

Largura da Correia (B)	Comprimento do Transportador = L (m)												
	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110
16"	0,37	0,47	0,54	0,61	0,70	0,80	0,90	1,01	1,10	1,20	1,31	1,42	1,53
20"	0,45	0,55	0,64	0,72	0,81	0,95	1,09	1,20	1,32	1,43	1,54	1,67	1,80
24"	0,57	0,70	0,83	0,91	1,01	1,20	1,33	1,52	1,67	1,80	1,92	2,06	2,19
30"	0,69	0,81	0,97	1,10	1,22	1,44	1,66	1,83	2,04	2,19	2,39	2,55	2,71
36"	0,75	0,94	1,08	1,23	1,35	1,58	1,80	2,03	2,24	2,45	2,64	2,84	3,03
42"	0,85	1,01	1,22	1,39	1,54	1,80	2,04	2,28	2,52	2,76	2,95	3,17	3,38
48"	1,02	1,20	1,32	1,64	1,80	2,13	2,40	2,71	2,98	3,23	3,48	3,74	4,00

Figura 4.34 - Potência N_v para acionar o transportador vazio a 1 m/s (FAÇO, 1996)

L (m)	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110
N_1 (HP)	0,50	0,63	0,74	0,81	0,95	1,11	1,25	1,42	1,50	1,64	1,75	1,87	2,05

Figura 4.35 - Potência N_1 para deslocar 100 t/h de material em um comprimento L (m) na horizontal (FAÇO 1996)

Alt. (m)	2	3	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30
N_h (HP)	0,8	1,2	1,9	2,8	3,7	4,7	5,6	6,5	7,4	8,4	9,3	10,2	11,1

Figura 4.36 - Potência N_h para elevar ou descer 100 t/h de material de uma altura H (m) (FAÇO, 1996)

Compr. das Guias (m)	5	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
N_g (HP)	0,60	1,26	2,52	3,18	3,84	4,56	5,28	6,00	6,72	7,38	8,10	8,88	9,60

Figura 4.37 - Potência N_g para vencer o atrito das guias laterais a 1 m/s (FAÇO, 1996)

Os valores obtidos para as potências selecionadas por meios das tabelas apresentadas e, a potência total efetiva N_e calculada a partir da Eq. 4.7 é apresentada na Tabela 4.15:

Tabela 4.15 - Potências obtidas.

N_v [HP]	N_g [HP]	N_1 [HP]	N_h [HP]	N_e [HP]
3,23	1,26	1,5	6,5	112,98

Por meio da potência efetiva calculada, pode-se determinar a potência do motor elétrico necessária para movimentar o sistema. O cálculo da potência do motor é dado pela Eq 4.8:

$$N = \frac{N_e}{\eta} \quad (4.8)$$

Em que:

N : potência do motor [HP];

N_e : potência efetiva total [HP];

η : eficiência da transmissão.

A eficiência do sistema de acionamento é selecionada considerando-se as perdas ocorridas na transmissão. O valor é obtido por meio da tabela da **Figura 4.38**. Para o transportador de correia A1J05, sabe-se que a transmissão se dá por meio de uma redução tripla, conforme visto no redutor FALK apresentado no **ANEXO IV**.

Transmissão	Eficiência (η)
Correias V e polias.....	0,94
Corrente e rodas dentadas - s/ caixa de óleo	0,93
Corrente e rodas dentadas - c/ caixa de óleo	0,95
Redução simples em redutores de engrenagens helicoidais ou tipo espinha de peixe em moto-redutores	0,95
Redução dupla, idem	0,94
Redução tripla, idem	0,93
Redução dupla em redutores "shaft-mounted" de engrenagens helicoidais	0,94
Redutores de rosca sem fim com redução até 20:1	0,90
Idem de 20:1 a 60:1	0,70
Idem de 60:1 a 100:1	0,50
Acoplamentos hidráulicos	0,96 - 0,98
Queda de voltagem	0,90 - 0,95

Figura 4.38 – Eficiência (FAÇO, 1996)

Dessa forma, para uma eficiência de 93%, tem-se que a potência do motor será 121,4 HP ou 123,2 CV. A **Figura 4.39** traz a configuração do acionamento do transportador de correia A1J05.

ACIONAMENTO	DESCRIÇÃO	
	MOTOR:	WEG - 125 CV - IV POLOS: 60 Hz - 3 Ø: 220/380/440
	TIPO:	TFVE PROT: IPW55 CARÇAÇA: 280S/MISOL: F CATEG: N FC: B3D
	REDUTOR:	TRANSMOT. TIPO: AH TAMANHO: 13-250
	CONFIGURAÇÃO:	REDUÇÃO: 1: 26,36
	ACOPLAMENTO DE ALTA:	VOITH: TV-422
	ACOPLAMENTO DE BAIXA:	FALK 40 G20
	POLIA MOTORA: Ø	POLIA MOVIDA: Ø Nº CANAIS/PERFIL:
	CONTRA RECUO:	VULCAN BSD-260-40-000 CONF:

Figura 4.39 – Descrição do acionamento do transportador A1J05 (FAÇO, 1996)

Por meio dos valores apresentados, percebe-se que o motor da fabricante WEG que se encontra instalado no equipamento, possui potência de 125CV, superior a potência calculada em projeto. Logo, conclui-se que não é necessário realizar uma repotencialização do sistema, mantendo-se assim a configuração atual do sistema de acionamento e seus parâmetros no transportador A1J05.

O cálculo da tensão efetiva, que se dá em função da potência efetiva calculada, e que representa a força tangencial responsável por promover a movimento da correia, é dada pela **Eq. 4.8**:

$$T_e = 75 \cdot \frac{N_e}{V} \quad (1.8)$$

Logo,

$$T_e = 4236,75 \text{ kgf}$$

• CÁLCULO DAS TENSÕES NA CORREIA

Para o cálculo das tensões na correia, são necessários os valores dos seguintes parâmetros:

- Peso do material (**Tabela 4.12**);
- Peso da correia (**Tabela 4.9**);
- Tensão para garantir uma flecha mínima entre os roletes;
- Força de atrito nos roletes de retorno;
- Fator de abraçamento da correia no tambor de acionamento

1) Tensão para garantir uma flecha mínima entre os roletes (T_0)

A flecha máxima utilizada no projeto é de 2%, segundo recomendação de boa prática do manual FAÇO (1996). Sendo assim, a **Eq. 4.9** apresenta o cálculo da tensão para garantir uma flecha mínima a partir da relação entre peso da correia, peso do material e espaçamento entre os roletes que permitem encontrar a tensã. Resultados encontram-se na **Tabela 4.16**:

$$T_0 = 6,25(W_m + W_b)a \quad (4.9)$$

Tabela 4.16 - Dados para o cálculo da tensão mínima na correia.

a [m]	W_m [kgf/m]	W_b [kgf/m]	T_0 [kgf]
1	180,05	26,65	1291,9

2) Força de atrito nos roletes de retorno (F_r)

A força de atrito é calculada por meio da **Eq. 4.10**:

$$F_r = 0,015 \cdot L \cdot W_b \quad (4.10)$$

Em que:

L: comprimento do transportador;

Logo, tem-se que:

$$F_r = 28,4 \text{ kgf}$$

3) Fator de abraçamento (K)

Para o cálculo do fator de abraçamento são necessários alguns parâmetros, tais como o arco de contato, o coeficiente de atrito entre o tambor e a correia, o tipo de tambor e o método de esticamento da correia.

Os métodos de esticamento de correias se baseiam em dois tipos distintos: esticamento por gravidade (ou automático) e por parafuso, conforme mostra **Figura 4.40**.

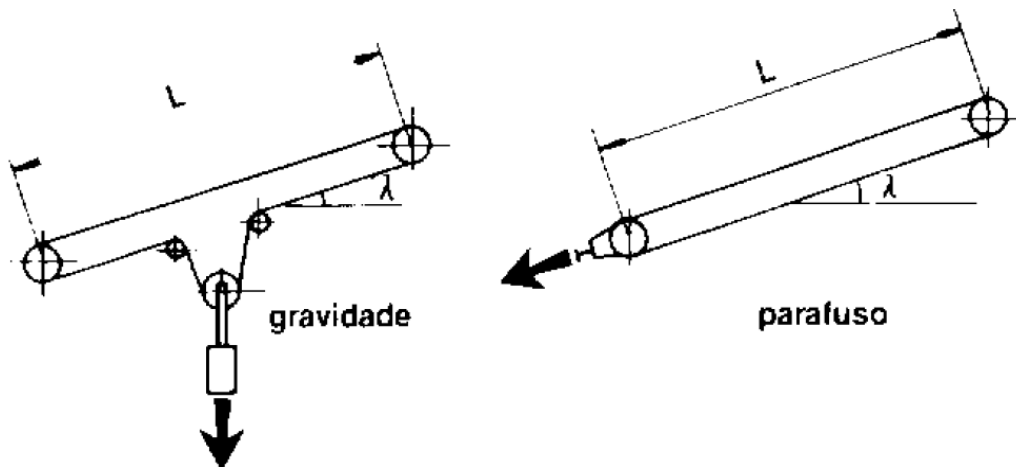


Figura 4.40 - Métodos de esticamento de correias (FAÇO, 1996)

Para determinar o método de esticamento da correia, deve-se levar em consideração a largura da correia e a distância entre os centros dos tambores, conforme mostra a tabela da **Figura 4.41** em que:

g: esticamento por gravidade;

p: esticamento por parafuso.

Largura da Correia	Distância entre Centros L (m)						
	>35	35	30	27	25	22	20
16"	g	p	p	p	p	p	p
20"	g	g	p	p	p	p	p
24"	g	g	g	p	p	p	p
30"	g	g	g	g	p	p	p
36"	g	g	g	g	g	p	p
42"	g	g	g	g	g	p	p
48"	g	g	g	g	g	p	p
54"	g	g	g	g	g	p	p
60"	g	g	g	g	g	p	p
72"	g	g	g	g	g	p	p

Figura 4.41 - Determinação do método de esticamento da correia (FAÇO, 1996)

Para uma largura de 48" da correia transportadora A1J05, e uma distância entre centros superior a 35 metros (aproximadamente 70m), se prever, do ponto de vista de projeto, um esticamento por gravidade para a correia, o qual é o sistema que já se encontra instalado no transportador.

Tipo de Acionamento	Arco de Contato	Esticador por Gravidade		Esticador por Parafuso	
		tambor de aço	tambor revestido com borracha	tambor de aço	tambor revestido com borracha
simples	180°	0,84	0,50	1,20	0,80
simples, com tambor de abraçamento	200°	0,72	0,42	1,00	0,70
	210°	0,66	0,38	1,00	0,70
	220°	0,62	0,35	0,90	0,60
	240°	0,54	0,30	0,80	0,60
duplo	380°	0,23	0,11	—	—
	420°	0,18	0,08	—	—

Figura 4.42 - Fator de abraçamento (K) (FAÇO, 1996)

No transportador A1J05, tem-se um acionamento simples, com esticador por gravidade, e o tambor de acionamento é revestido com borracha. Por ter, junto a este tambor, um tambor de abraçamento ou encosto, o tem-se um aumento do arco de contato entre a correia e o tambor de acionamento. Devido à dificuldade de se precisar o valor exato do arco de contato, selecionou-se um valor aproximado de 220°, visando um dimensionamento mais conservador. Com isso, a partir da Figura 4.42, o valor de K é igual a 0,35.

Assim, os valores correspondentes a tensão mínima T_0 os parâmetros relacionados encontram-se na Tabela 4.17:

Tabela 4.17 - Fator de abraçamento (K).

W_m [kgf/m]	W_b [kgf/m]	T_0 [kgf]	F_r [kgf]	K
180,05	7,7	347	1,79	0,35

• CÁLCULO DAS TENSÕES NO TAMBOR

Para o projeto dos transportadores de correia, as tensões nas mesmas devem ser calculadas, levando em conta a configuração envolvida. Para o transportador de correia A1J05, tem-se a configuração do transportador, conforme ilustrado na Figura 4.8 e, de maneira similar, na Figura 4.43, de acordo com o manual FAÇO (1996) em que se tem um transportador em aclave com acionamento no tambor da cabeça.

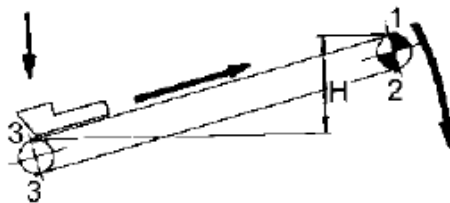


Figura 4.43 – Esquema de TC (FAÇO, 1996)

Segundo o manual FAÇO (1996), para essa configuração aplicam-se as seguintes equações apresentadas a seguir.

1) Tensão máxima no tambor de acionamento

A tensão máxima T_1 pode ser calculada mediante duas fórmulas. A Eq. 4.11 apresentada leva em consideração a força de atrito envolvida, e por isso foi a escolhida dentre as fórmulas do manual FAÇO (1996). Logo:

$$T_1 = T_e + T_0 + H \cdot W_b - F_r \quad (4.11)$$

Em que:

T_1 : tensão máxima no tambor de acionamento [kgf];

T_e : tensão efetiva na correia [kgf];

T_0 : tensão mínima admissível da correia [kgf];

H : desnível da correia de retorno [m];

W_b : peso da correia [kgf/m];

F_r : força de atrito nos roletes de retorno [kgf].

Assim, temos que:

$$T_1 = 4236,75 + 1291,9 + (17,1 \cdot 26,65) - 75,3$$

$$T_1 = 5909,03 \text{ kgf}$$

2) Tensão mínima no tambor de acionamento

Da mesma forma que para a tensão máxima, a tensão mínima no tambor de acionamento pode ser calculada mediante duas fórmulas. A fórmula utilizada é a que leva em conta a força de atrito, a exemplo da utilizada para a tensão T_1 . Logo:

$$T_2 = T_0 + H \cdot W_b - F_r \quad (4.12)$$

Substituindo os valores na fórmula, temos que:

$$T_2 = 1291,9 + (17,1 \cdot 26,65) - 75,3$$

$$T_2 = 1719 \text{ kgf}$$

3) Tensão no tambor de retorno

A tensão no tambor de retorno nesse caso equivale à tensão mínima na correia. Assim:

$$T_3 = T_0 = 1292 \text{ kgf}$$

4.2.3.2. MUDANÇAS APLICAS AO DIÂMETRO DOS TAMBORES

A **Figura 4.44** apresenta dados referentes ao conjunto dos tambores do transportador A1J05.

TAMBORES	LARGURA: 1370			REVESTIMENTO			MANCAL		
	TIPO	DIAM.	QTDE.	ESP.	TIPO	DUREZ. SHORE	EIXO Ø	TIPO	ROLAM.
	ACIONAMENTO	500	1	3/4"	RE	60 ^{±5}	110	SN-524	2 2 2 2 4
	RETORNO/EST.	400	2	—	—	—	80	SN-518	2 2 2 1 8
	DOBRA	320	2	—	—	—	80	SN-518	2 2 2 1 8
	EN COSTO	320	1	—	—	—	80	SN-518	2 2 2 1 8

Figura 4.44 – Diâmetro dos tambores do A1J05 (FAÇO, 1996)

Com a instalação da correia de aramida, se faz necessária uma readequação dimensional dos tambores, pois de acordo com MANUAL DE CORREIAS TRANSPORTADORAS (MÉRCURIO, s/d), a correia deve estar em conformidade com os diâmetros dos tambores, do contrário, a mesma não resistirá a flexão, desintegrando seus componentes.

Segundo a área técnica e de engenharia da CORREIAS MÉRCÚRIO S/A, para a seleção dos valores de diâmetro recomendados de acordo com a correia a ser aplicada, é necessário ter conhecimento em relação aos seguintes fatores:

- Tipo de correia;
- Faixa de trabalho em termos das tensões aplicadas;
- Tipo de emenda aplicada;

Para a correia de aramida a ser instalada no transportador A1J05, aplica-se a técnica de vulcanização via sistema de sobreposição, a qual recebe a denominação *Overlap* pela fabricante.

Em seguida, calcula-se a faixa de solicitação da correia, em relação a sua tensão admissível e a tensão de trabalho. Os cálculos se aplicam a todos os tambores do conjunto do transportador. Para o cálculo do diâmetro mínimo do tambor de acionamento, a **Eq. 4.13** apresenta inicialmente o cálculo de tensão unitária na correia, dada por:

$$T_i = \frac{T_1}{B} [Kgf/cm] \quad (4.13)$$

Em que:

T_1 : Tensão máxima no tambor de acionamento [Kgf]

B : Largura da correia [cm]

Para a largura de correia de 48'', que corresponde a 121,92cm, e uma tensão aplicada no tambor de acionamento de 5909,03kgf, a tensão unitária calculada foi de 48,46 kgf/cm. Em seguida, o cálculo da taxa de trabalho aplicado no tambor é dado pela **Eq. 4.14**:

$$T_x = \frac{T_i}{T_{adm}} * 100 [\%] \quad (4.14)$$

Em que:

T_i : Tensão unitária [Kgf/cm]

T_{adm} : Tensão admissível [Kgf/cm]

Sabendo-se que a tensão admissível da correia de aramida é de 160 Kgf/cm (**Tabela 4.9**). o valor calculado quanto a taxa de trabalho aplicada no tambor de acionamento foi de 30,3%. Dessa forma, de acordo com a tabela da **Figura 4.45**, o diâmetro mínimo que o tambor deve ter para a correia DPP1600, com emenda por sobreposição e faixa de trabalho entre 0 – 40% foi de 500mm. Pela **Figura 4.45**, verifica-se que o tambor de acionamento já possui 500mm, estando em conformidade, do ponto de vista dimensional, com a nova correia a ser instalada.

Emenda Tipo Overlap							
Tipo da Correia		DPP 630	DPP 800	DPP 1000	DPP 1250	DPP 1600	DPP 1800
Diâmetro da Polia (mm)	> 80% - Mín.	600	800	800	900	900	1000
	60% - 80% - Mín.	500	650	650	750	750	850
	40% - 60% - Mín.	450	500	500	600	600	700
	0% - 40% - Mín.	400	450	450	500	500	600

Referência: Tensão da Correia

Figura 4.45 – Diâmetro dos tambores para correia de aramida (MERCÚRIO, s/d)

Para os demais tambores, observa-se que o diâmetro mínimo das polias disponível para a correia de aramida DPP1600 com a menor faixa de trabalho possível (entre 0 – 40%) é de 500mm. Considerando-se que para o tambor de acionamento, o qual é o mais solicitado, a faixa de trabalho foi justamente a menor, logo conclui-se que, para os demais tambores, em vista de apresentarem valores ainda menores de solicitação, também deverão ter o diâmetro mínimo de 500mm, a exemplo do tambor de acionamento. Com isso, comparado aos valores dos diâmetros dos tambores presentes no transportador, se faz necessário, para a devida operação da correia, a mudança do dimensional dos mesmos, conforme for necessário. A **Tabela 4.18** apresenta os valores antigos e os novos que cada tambor deve ter.

Tabela 4.18 – Diâmetro dos tambores do A1J05 (atual e novo)

Tambores	Diâmetro atual (mm)	Novo Diâmetro (mm)
Acionamento	500	500
Retorno/Esticamento	400	
Dobra	320	
Encosto	320	

Como já mencionado anteriormente, o dimensionamento correto dos tambores ajuda a evitar possíveis problemas relacionados a correia e seus componentes. Dentre esses componentes que sofrem com uma eventual não conformidade dimensional das polias, a região da emenda se configura como a mais crítica, uma vez que é o ponto mais fraco da correia, necessitando de reposições frequentes. Do histórico de falhas ocorridas na correia do transportador A1J05, conforme visto na **Figura 4.10**, é de conhecimento que problemas relacionados a emenda são os que mais impactaram a operação do transportador, com cerca de 40,5% do tempo total de paradas do equipamento e com um total de nove ocorrências ao longo do período analisado. Sendo a dimensionamento incorreto dos tambores um dos fatores para ocorrência de falhas na emenda, espera-se que, com o redimensionamento realizado, ao longo da operação do transportador com a correia de aramida, possa ocorrer uma diminuição na incidência desse tipo falha quando comparado com a correia anterior.

4.2.3.3. REDIMENSIONAMENTO DO EIXO DO TAMBOR DE DOBRA

Do gráfico da **Figura 4.10** sabe-se que a incidência de quebras do eixo do tambor de dobra do transportador A1J05 foi um dos modos de falha que mais impactaram a operação do equipamento, representando cerca de 9,7% do tempo em que o equipamento ficou fora de operação por parada incidental mecânica (I2). A **Figura 4.46** destaca o posicionamento deste tambor no transportador.

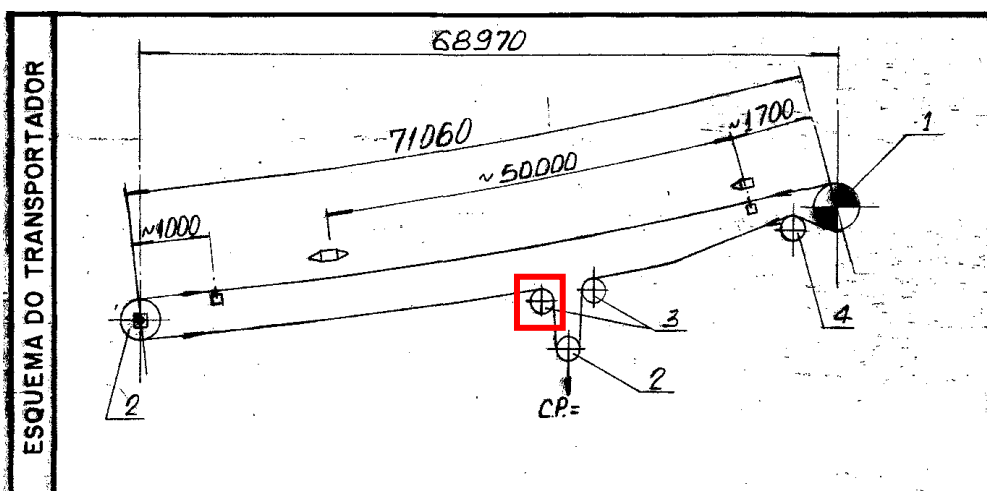


Figura 4.46 – Posição do tambor de dobra estudado no esquema do TC.

O tambor de dobra é mostrado na **Figura 4.47**.



Figura 4.47 – Posição do tambor de dobra estudado no TC (Arquivo pessoal)

A **Figura 4.44** apresenta algumas informações referente ao eixo do tambor de dobra. As informações encontradas na tabela contrastam com aquelas presente no desenho do transportador que encontra-se no **ANEXO I**. Isso se deve ao fato de, ao longo dos anos, intervenções foram realizadas no componente, de maneira a ter alguns de seus parâmetros modificados por razão eventual das falhas ocorridas. Muitas das alterações realizadas, no entanto, não tiveram nenhum tipo de documentação registrada, sendo necessário buscar informações a respeito das modificações feitas para se chegar à configuração atual com colaboradores da fábrica de cimento que atuaram na manutenção do transportador. Em geral, as mudanças ocorridas foram:

- Aumento do diâmetro do eixo, que passou de 50mm para 80mm na região do munhão;
- Fixação do eixo ao cubo do tambor passou a ser chavetada (**Figura 4.48**).



Figura 4.48 –Chaveta no eixo do rolo de dobra indicada por seta (Arquivo pessoal)

As falhas ocorridas no eixo sugerem que a falha ocorre em regiões próximas de onde se encontra a chaveta. De acordo com BUDYNAS (2011), os rasgos de chaveta representam regiões de concentração de tensão no eixo, uma vez que a descontinuidade criada no elemento altera a distribuição de tensão aplicada, aumentando sua intensidade em um ponto específico, podendo desencadear falhas. Dessa forma, a mudança do modo de fixação do eixo ao tambor por meio de chaveta, aliado a um dimensionamento incorreto do eixo, levaram a reincidência das quebras de eixo ocorridas no tambor de dobra.

Dessa forma, propõe-se o redimensionamento do eixo e mudança no modo de fixação deste com o cubo do tambor. Os cálculos para determinar o diâmetro do eixo levam em consideração dois critérios: a tensão atuante máxima e a deflexão máxima. As tensões da correia, também denominadas de forças máximas atuantes, são determinadas em função da potência transmitida, elevação do transportador, comprimento da correia e resistência encontradas ao longo do transportador (FAÇO, 1996).

Uma vez que o conjunto de tensões resultantes do acionamento e esticamento da correia já foram calculadas, determina-se a resultante das tensões aplicadas no tambor em que encontra-se o eixo. O tambor de dobra localiza-se no retorno da correia, junto ao sistema de esticamento, sendo então classificado como um tambor movido. Dessa forma, as tensões que atuam no mesmo somente serão as tensões atuantes no retorno da correia, que neste caso, é a tensão T_3 , que corresponde a tensão mínima aplicada na correia. A **Figura 4.49** ilustra a disposição do tambor de dobra no retorno da correia.

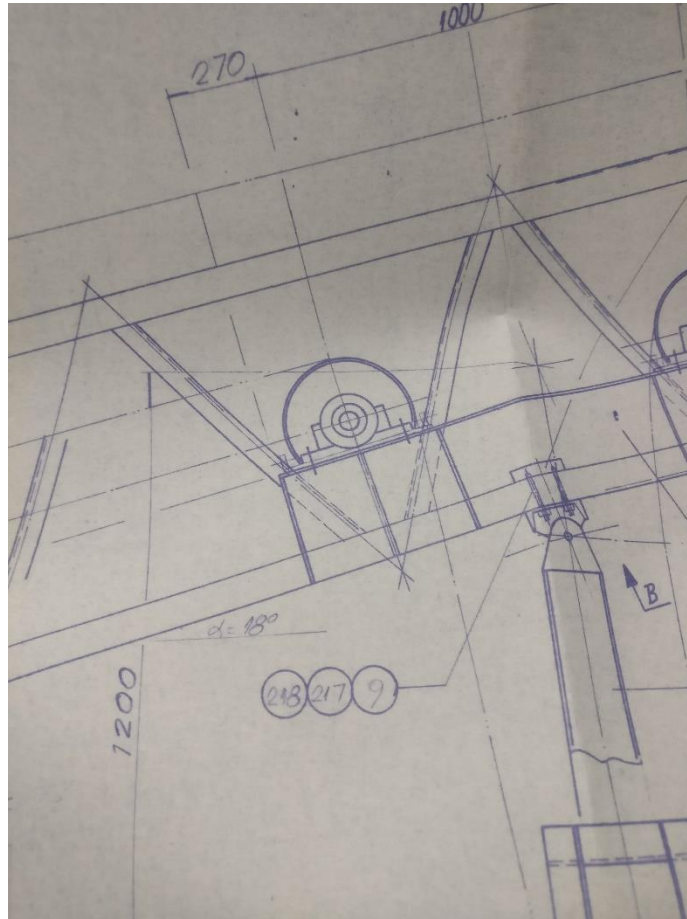


Figura 4.49 – Posição do tambor de dobra no desenho técnico (arquivo pessoal).

Para o cálculo da tensão resultante no tambor, deve-se saber o ângulo de abraçamento entre este e a correia. Com base **Figura 4.49** demonstrada, e diante da dificuldade de se medir o valor no equipamento, bem como a inexistência desse dado nos desenhos disponíveis, aproximou-se o valor do ângulo de abraçamento no tambor de dobra em 90° .

Logo, calcula-se a resultante dos esforços radiais aplicados no tambor R , conforme ilustrado na **Figura 4.50**. O valor obtido para a resultante foi de 15,29 KN.

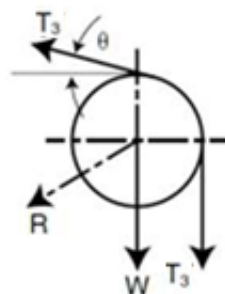


Figura 4.50 Resultante radial R aplicado no tambor (CEMA 2014)

O dimensionamento de eixos, segundo FAÇO (1996), segue os seguintes critérios: flexão cíclica, flecha máxima e torção. Por se tratar de um eixo de tambor movido, o dimensionamento

realizado somente leva em consideração os critérios de flexão e flecha, uma vez que não existe a transmissão de torque para tambores movidos. Dessa forma, os esforços presentes são a força radial resultante do tambor R (15,29 kN) e o peso do próprio eixo (1,54 kN). A resultante entre as forças consideradas foi 14,25 kN e é representada no diagrama de corpo livre do eixo apresentado na **FIGURA 4.51**.

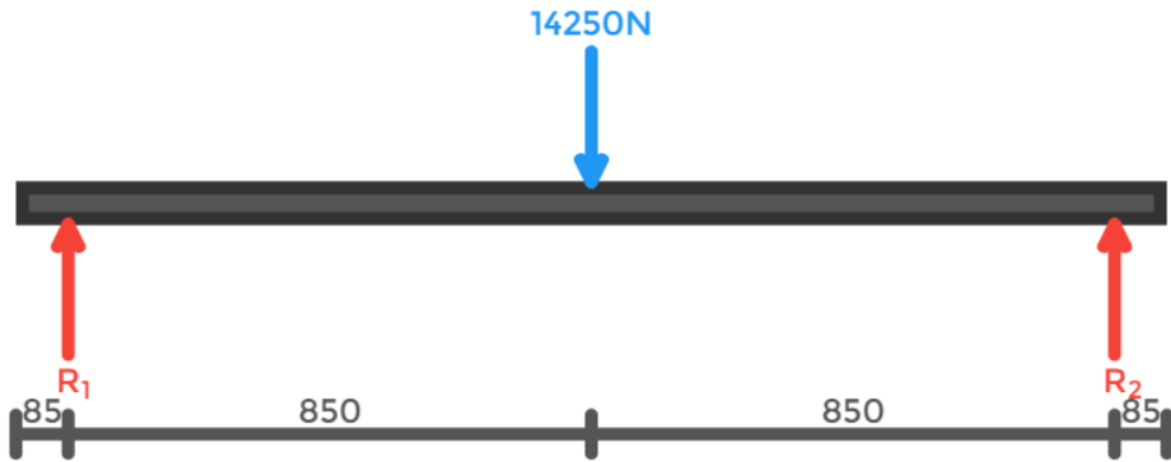


Figura 4.51 Diagrama de corpo livre do eixo do tambor movido.

O manual FAÇO (1996) prevê que o dimensionamento deve ser feito inicialmente quanto a flexão pura, e após isso, verificar quanto a flecha, escolhendo o maior diâmetro dentre os critérios avaliados. Dessa forma, calcula-se o diâmetro do eixo do tambor de dobra quanto as tensões aplicadas por meios das **Eq. 4.15**.

$$d_{flexão} \geq \sqrt[3]{\frac{32M_f}{\pi\sigma_{adm}}} \text{ [mm]} \quad (4.15)$$

Em que:

M_f : momento fletor (N.mm);

σ_{adm} : Tensão admissível.

A **Eq. 4.16** apresenta a fórmula para o momento fletor necessário para o cálculo do diâmetro:

$$M_f = \frac{P * (L - C)}{4} \quad (4.16)$$

Em que:

P: Resultante radial atuante sobre o eixo (14.250 N);

L: Distância entre mancais (1.700 mm);

C: Distância entre discos (1.300 mm).

Na sequência, para verificação quanto a flecha, calcula-se inicialmente o valor da flecha máxima, a partir a **Eq. 4.17**, a qual se aplica para correias com largura de até 54'':

$$f = \frac{L}{500} [mm] \quad (4.17)$$

E em seguida, verifica-se o diâmetro obtido a partir do valor de flecha máxima pela **Eq. 4.18**:

$$d_{flecha} \geq \sqrt[4]{\frac{2}{3} * \frac{PK_s(L - C)}{\pi E f} * (2L^2 + 2LC - C^2)} [mm] \quad (4.18)$$

Em que:

K_s : Fator de serviço (1,5);

E: Módulo de Young (206.000 MPa)

O fator de serviço K_s e a tensão admissível σ_{adm} empregados nas fórmulas apresentadas foram obtidas através de tabelas e recomendações do manual FAÇO (1996).

Devido aos recursos disponíveis no setor de oficina da fábrica de cimento estudada, decidiu-se por utilizar um aço SAE 1045, comumente utilizado para confecção de eixos. Ao tomar como referência para o dimensionamento os valores apresentados no manual FAÇO (1996), assumiu-se o valor de tensão admissível de 75 MPa, que corresponde a tensão admissível do aço SAE 1040 sem chaveta. Justifica-se a adoção deste valor devido ao fator de, no manual FAÇO, a tabela de referência de tensões admissíveis para aços de eixos, com e sem chaveta, não apresentar os dados referentes ao aço SAE 1045. Dentre as opções de aços apresentadas pelo manual (aços SAE 1040, 4041 e 4340), aquela que mais se aproxima do aço aplicado no estudo é o aço SAE 1040, principalmente em termos de percentual de carbono em sua composição. Este valor para tensão admissível dos aços SAE 1040 e 1045 não está de acordo com outras literaturas de referência, como em Budynas (2011), entretanto decidiu-se por adotar o valor apresentado em manual, a fim de se manter fiel as recomendações e valores assumidos no mesmo.

A **Tabela 4.19** apresenta os resultados dos equacionamentos apresentados anteriormente.

Tabela 4.19 – Resultado para o diâmetro do eixo

$d_{flexão}$ [mm]	d_{flecha} [mm]	f_{max} [mm]
66,6	90,2	1,13

Com os resultados obtidos, deve-se considerar para o redimensionamento do eixo do tambor de dobra do transportador A1J05 o diâmetro normalizado de 90mm, calculado de acordo com uma flecha máxima de 1,13 mm, em detrimento do diâmetro calculado segundo o critério quanto a flexão pura.

Com o valor do diâmetro do eixo obtido a partir dos cálculos realizados, necessita-se realizar seu escalonamento, a fim de facilitar a montagem do eixo nos mancais. Sabe-se que o eixo instalado no tambor de dobra possui somente um escalonamento. Segundo NORTON (2013), o procedimento de escalonamento de eixos deve ser feito da maneira menos abrupta possível. De acordo com recomendações de fabricantes de tambores, considera-se geralmente um diâmetro de eixo no mancal em torno de 75% do diâmetro entre os cubos (COMIN, SALVADOR). Dessa forma, para um diâmetro no munhão do eixo igual a 90 mm, tem-se que o diâmetro de centro do eixo terá 120 mm. O desenho técnico do eixo encontra-se no **Apêndice B**.

- **Seleção de rolamentos e mancais**

Segundo a NSK (2013), a seleção de rolamentos e mancais para o eixo deve levar em consideração alguns fatores, tais como:

- Tipo de aplicação;
- Desempenho e condições requeridas ao rolamento;
- Condições de operação e meio;
- Dimensões e espaço do rolamento.

Para o caso de rolamentos para eixos de tambores, em geral, os fabricantes classificam a operação como de alta carga, impacto, possibilidade de flexão e desalinhamentos do conjunto devido a correia. Dessa forma, NSK (2013), determina que, para aplicações com essas características, deve-se utilizar os rolamentos autocompensadores de rolos, os quais são normalmente utilizados em tambores de transportadores de correia. Quanto aos mancais, é necessário conhecer sua carga de ruptura, a fim de verificar se a mesma é superior a força resultante nos apoios do eixo. A magnitude dessa carga de ruptura vai variar de acordo com o ângulo da força resultante aplicada.

Na planilha de cálculos que se encontra no **Apêndice A**, registrou-se o cálculo para seleção do rolamento com base na capacidade de carga básica suportada pelo rolamento. Como condições de contorno, considerou-se uma rotação máxima do eixo no mancal de 76,6 rpm (rotação de operação), carga radial resultante (F_r) de 7.123 N (conforme se deduz pelo diagrama de corpo livre da **FIGURA 4.51**), carga axial (F_a) de 712,3 N, na qual considera-se o valor da carga axial como sendo 10% da carga radial (COMIN, SALVADOR), confiabilidade de 90% e vida nominal (L_h) estimada de 30.000 horas, conforme recomendação SKF (2015).

Inicialmente, selecionou-se no catálogo NSK (2013) o valor do coeficiente de vida (f_h) com base na rotação do eixo, resultando no valor de 0,8. Em seguida, calculou-se a carga dinâmica equivalente (P), dada pela **Eq. 4.19**:

$$P = XF_r + YF_a \text{ [N]} \quad (4.19)$$

Em que:

X : Coeficiente de carga radial;

Y : Coeficiente de carga axial.

Para determinação dos valores de X e Y , devia-se conhecer inicialmente o valor do fator de carga e , conforme observado na tabela da **FIGURA 4.52**. O valor deste parâmetro foi selecionado em catálogo a partir do valor do diâmetro do eixo no mancal. De acordo com a SKF (2015), o valor do fator de carga para um diâmetro de 90 mm foi de 0,24, conforme visto no **ANEXO V**.

Carga Dinâmica Equivalente
 $P = XF_r + YF_a$

$F_a/F_r \leq e$		$F_a/F_r > e$	
X	Y	X	Y
1	Y_3	0,67	Y_2

Carga Estática Equivalente
 $P_0 = F_r + Y_0 F_a$
 Os valores de e , Y_2 , Y_3 e Y_0
 estão relacionados na tabela abaixo.

Figura 4.52 Cálculo de carga dinâmica equivalente e seus coeficientes (NSK, 2013).

Uma vez que a relação apresentada entre as cargas axiais (F_a) e radiais (F_r) dadas na **FIGURA 4.52** foi menor que o valor do fator de carga e , sabia-se então que os valores de X e Y seriam respectivamente, 1 e Y_3 , sendo este último igual a 2,8, conforme visto no **ANEXO V**. Dessa forma, o valor calculado para a carga dinâmica equivalente foi igual a 9.117 N.

Em seguida, calculou-se a capacidade de carga básica (C), a qual representa a capacidade de carga do rolamento (NSK, 2013). Pode-se calcular este parâmetro a partir da **Eq. 4.20**.

$$C = \frac{f_h}{f_n} P \text{ [N]} \quad (4.20)$$

Em que:

f_h : coeficiente de vida nominal;

f_n : coeficiente de velocidade.

Os valores dos coeficientes podem ser obtidos a partir da **FIGURA 4.53**, no qual, a partir das condições de contorno dadas, chegou-se aos valores de 3,45 e 0,8 para f_h e f_n , respectivamente.

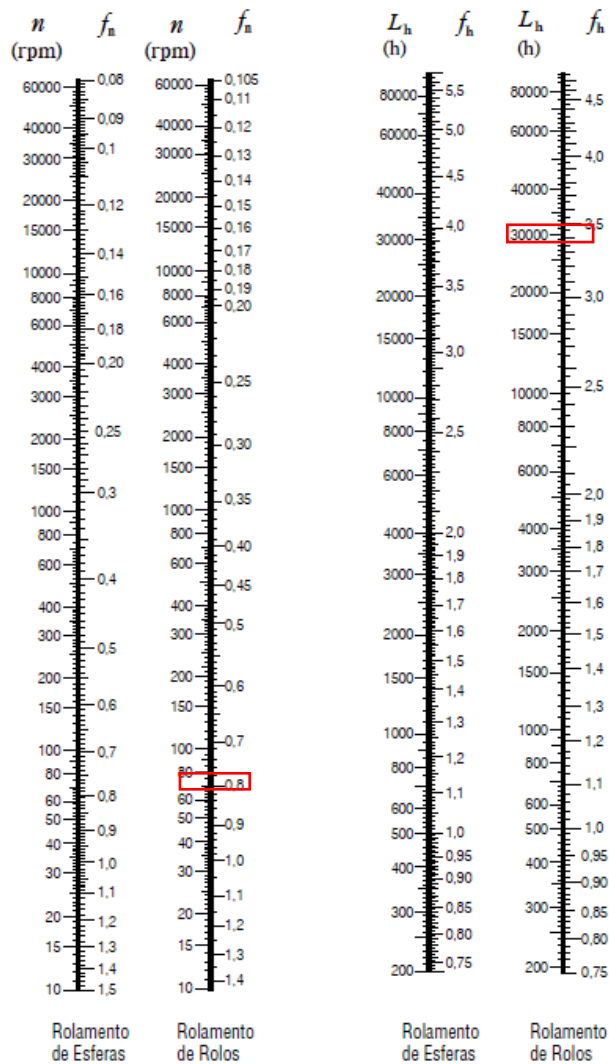


Figura 4.53 Coeficiente de velocidade (à esquerda) e coeficiente de vida (à direita) (NSK, 2013).

Logo, para o valor de capacidade de carga básica calculado de 39,3 KN, e um diâmetro do eixo com 90mm, o rolamento SKF 22218 foi selecionado. No entanto, por uma questão de facilidade de manutenção, decidiu-se por selecionar um conjunto rolamento-bucha, o qual é utilizado para fixar rolamentos com furo cônico em um assento cilíndrico (SKF, 2015). Essa aplicação é comumente utilizada para eixos escalonados. Para o caso do eixo projetado, selecionou-se um rolamento SKF 22220 EK, o qual possui um furo de 100mm, e uma bucha de fixação H 320. A **Figura 4.54** ilustra um esquema do conjunto rolamento-bucha. As especificações do conjunto selecionado encontram-se no **ANEXO V**.

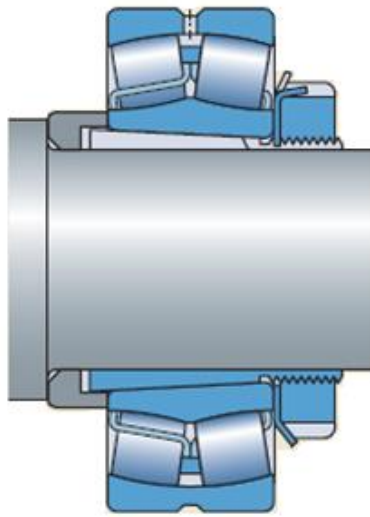


Figura 4.54 – Conjunto rolamento-bucha (SKF, 2015)

Para a caixa do mancal, de acordo com as especificações do diâmetro do eixo e tipo de rolamento aplicado, selecionou-se o SNN 520-617. A verificação quanto aos valores de carga de ruptura se mostrou segura, visto que a força resultante que atua no mancal (7,12 KN) está muito abaixo do limite de carga suportado para qualquer direção considerada, o que se justifica pelo nível de sollicitação mais brando sofrido pelo tambor de dobra, sobre o qual, somente tensões no retorno da correia são consideradas. As especificações do mancal SNN 520-617 encontram-se no **ANEXO VI**. A **Figura 4.55** ilustra o mancal selecionado.

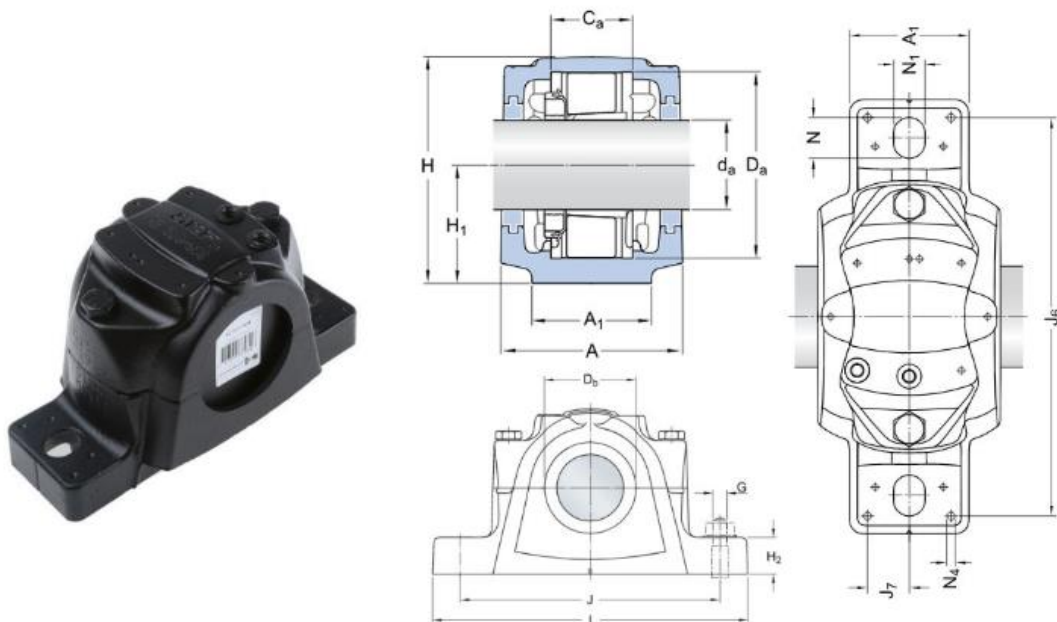


Figura 4.55 – Mancal SNN 520-617 (NSK, 2013)

O kit de vedação selecionado foi G520, do tipo de G, conforme indicado no catálogo NSK (2013). Esse tipo de vedação apresenta boas características quanto a aplicações quando exposto a poeira, partículas grande e água, ambiente no qual o transportador de correia A1J05 encontra-se exposto. A **Figura 4.56** apresenta algumas características da vedação selecionada.

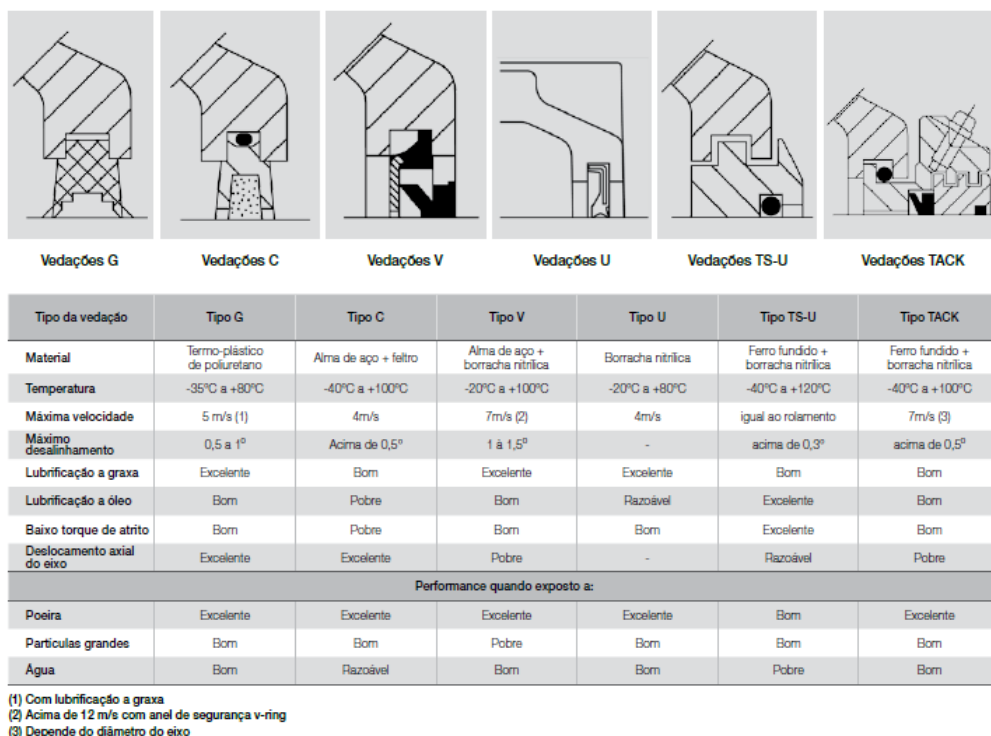


Figura 4.56 –Vedações (NSK, 2013)

É de boa prática, segundo recomendação da NSK (2013), que a disposição dos mancais seja feita de maneira a se ter um mancal que posiciona o eixo axialmente, no qual o rolamento é classificado como “lado fixo”. Este lado impede o deslocamento axial no eixo, e para isso, utiliza dois anéis de bloqueio. O outro lado é classificado como “lado livre”, e qual permite em certa medida a movimentação axial do eixo. Com isso, evita-se que o conjunto de mancais e rolamentos sofra com cargas excessivas caso ambos os lados estivessem fixos, aumentando assim sua vida de operação. Dessa forma, a **Tabela 4.20** apresenta a especificação do conjunto aplicado para ambos os lados, conforme previsto no catálogo NSK (2013).

Tabela 4.20 – Especificação de mancais de acordo com posição

Lado Livre	Lado Fixo
<p>Eixo com diâmetro de 90mm, 1 rolamento autocompensador de rolos 22220EK e vedações labirinto em ambos os lados</p> <p>Peças requeridas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 caixa SNN520 • 1 rolamento SKF 22220EK • 1 bucha de fixação SKF H 320 • Vedação de lábio duplo tipo G520 	<p>Ponta de eixo com diâmetro de 90mm, 1 rolamento autocompensador de rolos 22220EK e vedações labirinto em ambos os lados</p> <p>Peças requeridas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 caixa SNN520 • 1 rolamento SKF 22220EK • 1 bucha de fixação SKF H 320 • Vedação de lábio duplo tipo G520 • 2 anéis de bloqueio

- **Fixação do eixo por anel de fixação**

Como foi observado na **Figura 4.48**, a fixação do eixo no tambor de dobra do transportador A1J05 é feita por meio da utilização de chaveta, e para isso, se faz necessário a realização de rasgos no eixo e no cubo para acomodação desse elemento, o que acaba por criar regiões de concentração de tensão (NORTON, 2013) que vem a contribuir com a ocorrência de falhas. A condição de subdimensionamento do eixo é um dos fatores que contribui com as falhas recorrentes, no entanto, a aplicação de chaveta para a fixação de eixos de tambores de retorno não é recomendada por fabricantes, visto que, por ser um tambor movido, não existe momento fletor aplicado no eixo, somente flexão pura, o que faz com que a utilização de chavetas, que são elementos comumente aplicados para transmissão de torque entre elementos (BUDYNAS, 2011), não seja a mais recomendada.

A fim de evitar a ocorrência de falhas no eixo, propõe-se a substituição da chaveta por um anel de fixação, a fim de se eliminar os rasgos de chaveta e suas concentrações de tensão, o que aumenta a capacidade de carga no eixo significativamente (PALMA, 2009). A **Figura 4.57** apresenta um anel de fixação. Além de promover a fixação do eixo e cubo por pressão, os anéis de fixação também promovem a transmissão de torque e cargas axiais, elevadas (COMIN, SALVADOR, s/d).



Figura 4.57 – Anel de Fixação (RINGFEDER, 2016)

O princípio de funcionamento dos anéis de fixação é demonstrado na **Figura 4.58**. Quando os anéis laterais são apertados, provoca-se uma expansão do anel externo e uma contração do anel interno, favorecendo o aparecimento de pressões P_1 e P_2 que incidem sobre o cubo e eixo, respectivamente (FAÇO, 1996).

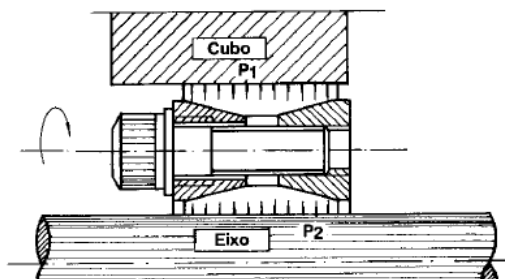


Figura 4.58 – Princípio de funcionamento do anel de fixação (FAÇO, 1996)

Utilizou-se do catálogo da RINGFEDER® para seleção do anel de fixação a ser instalado no tambor do rolo de dobra. Para isso, é necessário ter como especificação o diâmetro do eixo na região do cubo. A determinação do diâmetro mínimo do eixo no cubo pode ser feita pela seleção do anel de expansão (KLEINSORGE, GELAIS, MARCONDES, PERTENCE, 2015). Para o eixo dimensionado, verificou-se que o diâmetro especificado na região do cubo teria 120mm com base em recomendações previamente comentadas. Do catálogo RINGFEDER®, é possível selecionar anéis de fixação baseado nessa medida para o diâmetro interno do anel, o que corrobora para a medida no eixo adotada anteriormente com base nas recomendações de fabricantes de tambores. Logo, do catálogo, selecionou-se o anel de fixação RFN7012, ilustrado na **Figura 4.59**.



Figura 4.59 – Anel de fixação RINGFEDER RFN 7012 (RINGFEDER, 2016)

Algumas especificações técnicas do anel de fixação RFN7012 são apresentadas na **Tabela 4.21**.

Tabela 4.21 – Especificações do anel de fixação RFN 7012

ANEL RINGFEDER RFN 7012
Diâmetro interno (eixo): 120mm
Diâmetro externo (cubo): 200mm
Largura do Anel: 47mm
Pressão entre anel e eixo: 214 N/mm ²
Pressão entre anel e cubo: 155N/mm ²

4.3. ESTUDO DE CONFIABILIDADE DO TC A1J05 APÓS MELHORIAS REALIZADAS

Com a mudança da correia e redimensionamento dos tambores do transportador de correia A1J05, as quais foram melhorias realizadas com base em alguns dos estudos feitos por meio deste relatório, decidiu-se por avaliar a confiabilidade do equipamento a fim de verificar a efetividade das mudanças feitas.

Dentre as mudanças propostas no transportador de correia, a implementação da correia de aramida DPP1600 e a readequação do diâmetro dos tambores para proporcionar uma condição ideal para operação da correia foram realizadas no mês de Junho do presente ano. No que compreende o período de cinco meses desde a instalação da nova correia e mudanças nos tambores, foi realizado o levantamento das paradas incidentais do transportador de correia A1J05, o que é mostrado no gráfico da **Figura 4.60**.

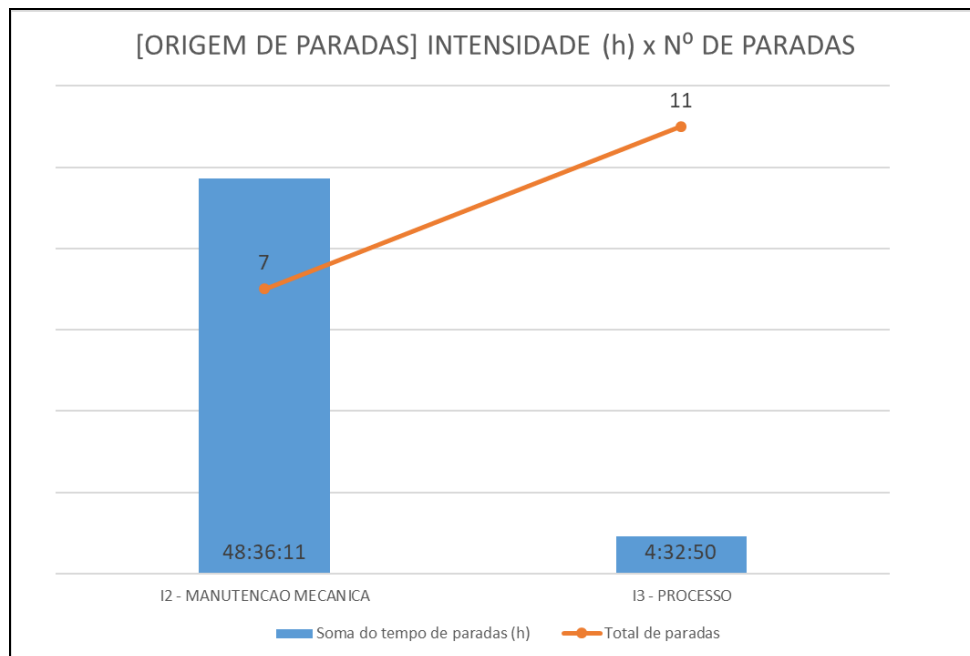


Figura 4.60 Gráfico de intensidade por frequência da A1J05 desde Junho/19

A **Tabela 4.22** a seguir apresenta os dados referentes ao número de paradas do equipamento por motivo incidental e quanto tempo permaneceu fora de operação.

Tabela 4.22 – Horas paradas e número de paradas da AIJ05

Tag de Equipamento	Horas de Paradas	Número de Paradas
AIJ05	53:09:01	18

Dentro do período do período em que ocorreram as 18 paradas registradas, fez-se o levantamento dos tempos até falhas (em horas) entre as paradas, o que é mostrado na **Tabela 4.23**.

Tabela 4.23 – Tempos entre falhas da AIJ05 desde junho/19

AIJ05 Tempo até a Falha (h)										
1355.35	0.53	5.48	45.82	148.47	0.12	162.12	15.27	224.23	803.6	0.2
59.55	52.8	59.62	0.17	318.25	79.7					

Com o auxílio do *software* ProConf, os dados apresentados na **Tabela 4.23** foram processados, obtendo-se os histogramas para as principais medidas de Confiabilidade. O histograma para a função de risco $h(t)$ é apresentado na **Figura 4.62**.

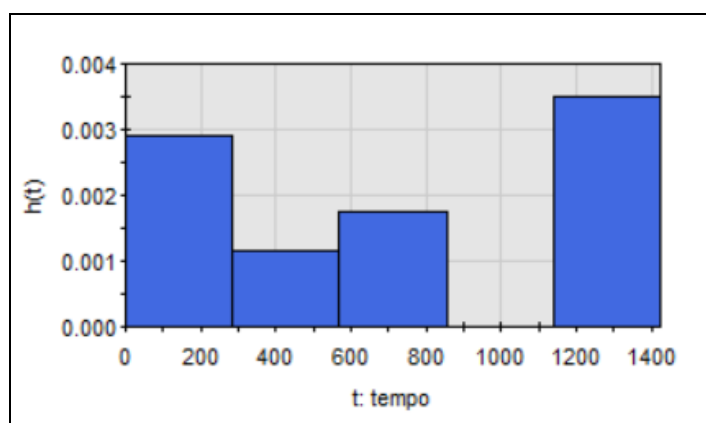


Figura 4.61 Histograma da função de risco $h(t)$ (ProConf)

Assim como da primeira análise feita, observa-se uma tendência inicial de queda da taxa de falha, a qual só tende a subir depois de transcorrido um período de 600h nesta análise. O comportamento da função taxa de risco observado no histograma, desconsiderando-se as descontinuidades apresentadas por conta das características dos tempos entre falhas registrados, revelam um comportamento similar ao observado na curva da banheira. Isso reitera um comportamento similar da distribuição de Weibull, que segundo Fogliatto e Ribeiro (2011), é bastante apropriada para modelagens com esse padrão de variação para a taxa de risco (constante, estritamente crescente e estritamente decrescente) e amostras com comportamentos distintos.

A fim de se confirmar a primeira evidência de modelagem dos dados usando-se a distribuição de Weibull, realizou-se os testes baseados nos métodos gráficos e analítico (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011) para definição da distribuição que melhor se ajusta aos dados. Os gráficos de papel de probabilidade das amostras de tempo estudadas são apresentas na **Figura 4.62**.

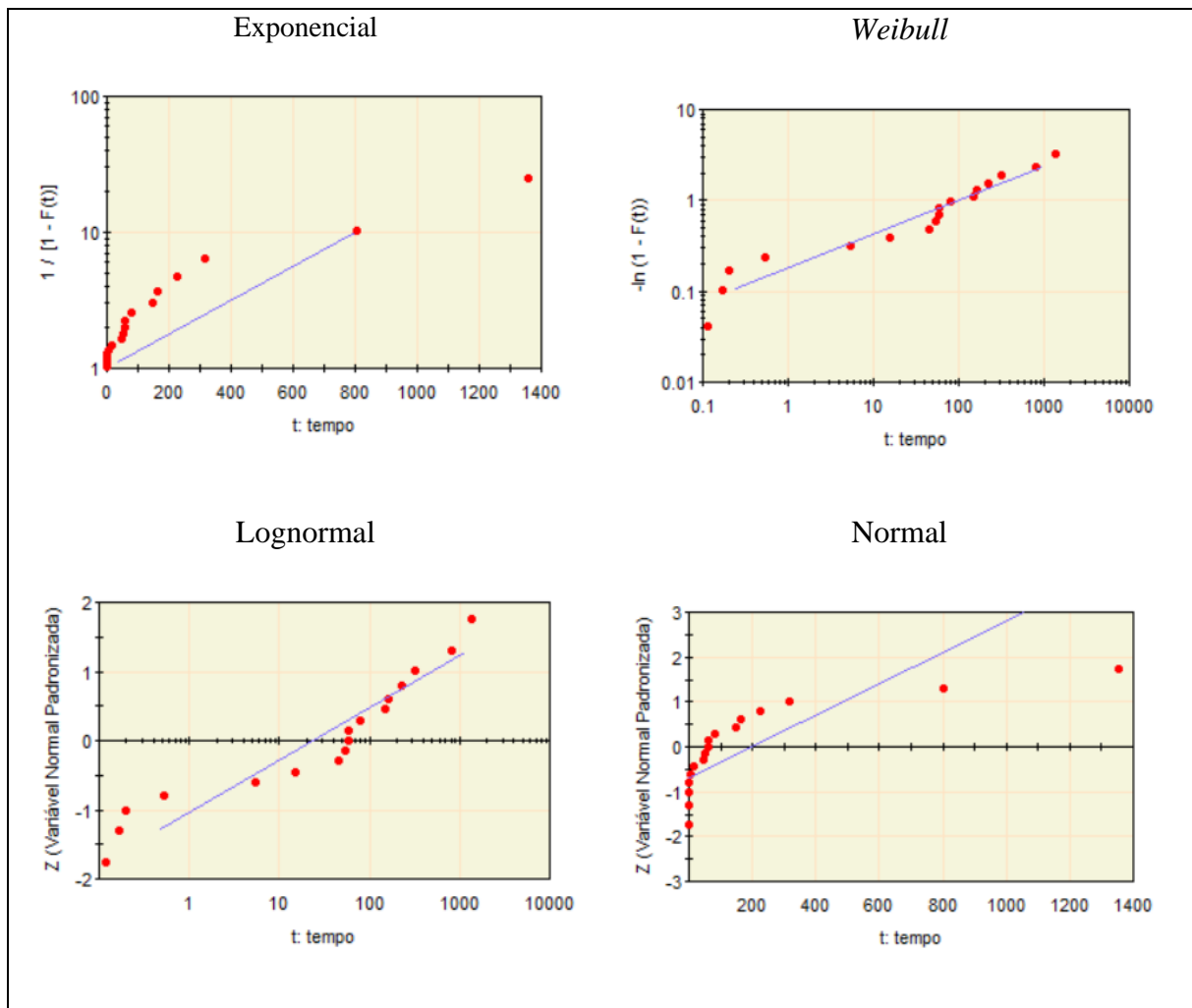


Figura 4.62 Gráficos de papeis de probabilidade (ProConf)

A análise da distribuição dos tempos processados em torno da reta-base das distribuições consideradas revela que a distribuição Weibull, mais uma vez, foi a que melhor se ajustou aos dados. A fim de confirmar a impressão deixada por meio da análise visual dos gráficos de papel de probabilidade, realizou-se o teste de hipóteses, a fim de confirmar a adequação dos dados da amostra a distribuição de *Weibull*. Por meio dos testes de aderência qui-quadrado (χ^2) e Kolmogorov-Smirnov (K-S), pelos quais calculam-se o parâmetro populacional p , o qual será adotado como parâmetro para definir o nível de significância de cada teste realizado, de acordo com um valor de referência adotado para a análise. A exemplo do primeiro estudo de Confiabilidade realizado, adotou-se o nível de significância de 5%. Com isso, a **Tabela 4.24** traz os resultados dos testes de aderência realizados para as distribuições *Weibull* e Lognormal, para efeito de comparação.

Tabela 4.24 – Nível de Significância para ajuste dos dados do transportador A1J05

A1J05 Nível de Significância			
Distribuição	χ^2	K-S	Decisão ($p > 0,05?$)
Lognormal	1,06	0,5	Rejeitada
Weibull	0,7	0,7	Não Rejeitada

Os resultados do teste de hipóteses confirmaram a distribuição *Weibull* como a distribuição que mais adequada para o ajuste das amostras. Apesar de ser rejeitada, observa-se que a distribuição Lognormal fica muito próxima de ser adequada ao ajuste dos dados. Isso se deve devido a característica da distribuição Lognormal de ter boa aplicabilidade para modelagem de unidades reparáveis.

Definida a distribuição *Weibull* para a modelagem dos tempos até falha do transportador de correia A1J05 nos últimos cinco meses transcorridos, realiza-se o ajuste dos dados, calculando-se assim os valores de MTBF, a quantidade de horas que quantidades distintas da amostra vão falhar (t_{10} e t_{50}) e os parâmetros de forma e escala. A medida do tempo médio entre falhas, considerando-se o desvio padrão mensurado, é o principal fator para avaliar se as melhorias aplicadas no transportador, de fato, resultaram no aumento de sua Confiabilidade. Os valores calculados são apresentados na **Tabela 4.23**.

Tabela 4.23 – Resultado do ajuste de dados pela distribuição Weibull.

A1J05 Estatística	
Parâmetro	Resultado
t_{10} (h)	0,36
t_{50} (h)	34,48
MTBF (h)	256,31
Desvio Padrão	765,07
γ	0,45
θ	90,32

O valor obtido para o MTBF, de acordo com os dados ajustados, revela-se menor do que o obtido no primeiro estudo, quando foi encontrado um valor de aproximadamente 427 horas. A comparação feita por si, poderia indicar uma diminuição da Confiabilidade do transportador de correia A1J05, mesmo com as melhorias aplicadas. Entretanto, alguns pontos devem ser levados em consideração nesta análise:

- O conjunto amostral analisado no primeiro estudo é muito superior ao analisado agora, compreendendo um período de nove anos de registros contra somente cinco meses do atual, o

que influência diretamente na confiabilidade do resultado, visto que quanto maior o número de dados analisados, mais preciso será o ajuste (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2011);

- Se o desvio padrão for considerado, tem-se a possibilidade do MTBF mensurado para essa análise ser superior ao obtido na primeira, o que apresenta um cenário em existe uma melhora da Confiabilidade do equipamento;

As conclusões que foram apresentadas, no que diz respeito a comparação do MTBF de ambos os estudos para o mesmo equipamento, de certa forma, já eram esperadas, visto que seria necessário um *range* maior de tempo após implementadas as melhorias para se ter efetivamente uma comparação leal dos valores obtidos. No entanto, deixa-se registrado este estudo para efeitos do propósito deste relatório em, ao menos, testar a efetividade das melhorias aplicadas no equipamento com base em um estudo de engenharia detalhado, usando-se conceitos de Confiabilidade e Engenharia Mecânica.

5. CONCLUSÕES

As conclusões baseadas nos resultados obtidos, análises realizadas e sugestão de trabalhos futuros são apresentadas neste capítulo.

O presente estudo procurou apresentar, de forma objetiva, a importância da implementação de estudos detalhados na área de Confiabilidade, em conjunto com a Engenharia Mecânica, na modelagem e análise de sistemas industriais, os quais são essenciais na área de manutenção na indústria.

Com o intuito de enriquecer a experiência deste trabalho, o estudo apresenta real possibilidade de aplicação, na medida que foi realizado para dar embasamento técnico e teórico a um projeto de melhoria mecânica que foi aplicado em um transportador de correia de uma fábrica produtora de cimento, localizada na cidade de Sobradinho-DF, e que faz parte de uma grande empresa multinacional brasileira, com participação ativa na economia local e nacional.

Partindo de um conjunto específico de transportadores de correia que desempenham a função de transporte do material calcário na produção do cimento, a metodologia de análise apresentada neste trabalho buscou inicialmente estimar a Confiabilidade desses transportadores, a partir do emprego de ferramentas de análise de Confiabilidade a um conjunto de dados baseado no histórico e características operacionais desses equipamentos. Ao realizar este trabalho, foi possível precisar a real condição de operação dos transportadores dentro de seus respectivos processos, direcionando o esforço do estudo técnico e analítico dos profissionais formados em Engenharia Mecânica na atuação de projetos que visem a melhoria de performance, desempenho e durabilidade desses equipamentos dentro do processo produtivo. O alto custo envolvido em projetos desse nível reforça ainda mais a necessidade de realização deste estudo preliminar antes da realização do investimento pela área de manutenção da empresa. Além disso, a metodologia de análise baseada em Confiabilidade é imensamente mais barata quando comparado com os altos custos que envolvem outros meios de análise sem um estudo direcionado, como ensaios mecânicos em componentes de equipamentos robustos e estratégicos na produção, por exemplo.

No método de análise empregado no estudo de Confiabilidade realizado, utilizou-se como apoio forte fundamentação teórica apresentada em livros e artigos produzidos para estudos deste fim. A utilização do *software* de Confiabilidade ProConf no auxílio das análises foi também fundamental para viabilizar a realização deste estudo. A modelagem dos dados embasada em métodos gráficos e analíticos, com influência marcante de funções e distribuições probabilísticas só se fez possível graças a união desses dois elementos, teóricos e tecnológicos, na análise.

No conjunto dos transportadores que foram alvo deste estudo, levou-se em consideração não somente o espaço amostral que cada uma apresentava dentro do histórico pesquisado, o que é de grande relevância para estudos de Confiabilidade, os quais, demandam grande quantidade de dados para alcançar maior precisão, como também o impacto que esses transportadores geraram ao processo

produtivo devido ao número de horas que se mantiveram inoperantes. Dessa forma, foram identificados os transportadores em condição mais crítica, baseada em seus históricos, direcionando assim o estudo de Confiabilidade sobre elas. Essa seleção se torna importante do ponto de vista estratégico, pois permite direcionar os esforços da área de manutenção primeiramente aos equipamentos de maior impacto dentro do processo, minimizando assim custos.

Na medida que os transportadores foram selecionados, seus conjuntos amostrais foram utilizados como base para seu estudo de Confiabilidade. Após realizar a verificação do ajuste dos dados as distribuições de probabilidade estudadas por meio da aplicação de métodos de teste gráfico e analítico, a distribuição de probabilidade *Weibull* foi a que melhor se revelou mais fiel ao conjunto de dados dos transportadores de correia. Assim, foi possível obter as várias medidas de confiabilidade, dentre elas, o tempo médio entre falhas, valores limites de tempo para falha, mensurados para 10% e 50% das falhas ocorridas e taxa de risco. A análise da fase de vida dos transportadores de correia estudados também foi possível. Chegou-se à conclusão que tais correias apresentam uma tendência de mortalidade infantil, fase inicial da curva da banheira, demonstrando assim a ocorrência de falhas prematuras nesses transportadores, que podem ser originadas por deficiências no processo de fabricação, instalação incorreta ou matérias fora da especificação.

Sendo assim, notou-se que o estudo de Confiabilidade dos transportadores de correia analisadas se mostrou de grande importância, visto que proporcionou um direcionamento dos esforços da equipe de manutenção para quais equipamentos necessitavam de maior atenção devido a sua criticidade, tanto do ponto de vista operacional, como também pelo histórico de falhas apresentado. Esta análise elimina possíveis tomadas de decisão baseadas em tentativa e erro, o que pode gerar inúmeros prejuízos a empresa, desde de perda de produção, consumo excessivo de matéria-prima e, principalmente, gastos exagerados com mão de obra na realização das atividades de manutenção. A técnica de análise baseada em Confiabilidade ainda está em desenvolvimento e precisa ser cada vez mais explorada pela indústria brasileira na obtenção de melhores resultados.

Os estudos de melhoria que se seguiram à análise de Confiabilidade feita procuraram demonstrar o rigor técnico de projetos de Engenharia Mecânica na indústria, dando o caráter de importância dos conhecimentos apreendidos e aplicados pelo engenheiro em sua atividade profissional. Neste processo, tendo identificado os modos de falha que mais comprometeram a operação do transportador apontado como mais crítico, foi realizado o estudo de cada ocorrência. Neste contexto, foi realizada a seleção de uma correia transportadora que apresentava características mais adequadas à aplicação do transportador, bem como uma vida útil superior. O redimensionamento do transportador foi feito a fim de se verificar a necessidade de readequação do equipamento quanto a nova correia instalada. E ainda, no processo de análise dos modos de falha, foi realizado o redimensionamento do eixo de um dos tambores do transportador que apresentava um histórico de quebras durante a operação. Com a mudança da correia de fato executada, e proposta de execução do projeto do eixo dimensionado, espera-se obter um aumento

da confiabilidade e disponibilidade do transportador estudado dentro do processo de produção, gerando assim benefícios para a fábrica de cimento estudada.

Como sugestão de projetos a serem desenvolvidos, com base no apresentado previamente, pode-se realizar novos estudos de Confiabilidade com transportadores de correia de outros perfis, ou mesmo outros equipamentos, realizando a modelagem de seus tempos de vida baseada em métodos de análise de Confiabilidade. Uma outra possibilidade é a realização de estudos de melhoria de projeto mecânico voltados aos equipamentos estudados, explorando e apresentando soluções para outros modos de falha, com o objetivo de melhorar o rendimento e eficiência do equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6177 - Transportadores contínuos - Transportadores de correia - Terminologia**, São Paulo, 1999.
- ABPC – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Fluxograma de Fabricação de Cimento**. Disponível em: <https://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/fabricacao/fabricacao/>. Acesso em: 15.jun.2019.
- CAMPOS, André L. R. F. **Dimensionamento de um transportador contínuo para o transporte de minério de bauxita** (Graduação) – Universidade de Brasília. Faculdade do Gama, Brasília, 2013. Orientação: Maura Shzu.
- CERVEIRA, D. S.; SELBITTO, M. A. Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC): análise quantitativa de um Forno Elétrico a Indução. **Produção Online**, v. 15, n. 2, p. 405-432, 2015.
- C824, 2009. Correias transportadoras: guia básico / Eletrobrás [et al.]. Brasília: IEL/NC, 2009. 177 p. : il.
- ELSAYED, E. A. *Reliability engineering*. 1. Ed. Addison Wesley Longman, Inc., Reading, MA, 1996.
- FAGUNDES, A. *et al.* Estudo de caso: análise quantitativa de confiabilidade e disponibilidade de de um torno CNC, baseado na metodologia RCM (Reliability Centred Maintenance), aplicado à área de manutenção industrial. *In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 31., 2011, Belo Horizonte. **Anais Eletrônicos...** Belo Horizonte: ABEPRO, 2011.
- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- HALPERN, S. *The assurance sciences. An introduction to quality control and reliability*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1978.
- HAVIARAS, G. J. **Metodologia para análise de confiabilidade de pneus radiais em frota de caminhões de longa distância**. 2009. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- LEEMIS, L. M. **Reliability**: probabilistic models and statistical methods. New Jersey: Prentice-Hall, 1995.
- MERCÚRIO. **Manual Técnico de Correias Transportadoras**. São Paulo: Editora Schoba, 3ª Edição. [s/d].
- NELSON, W. *Applied life data analysis*. 5. Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1982.
- PIAZZA, G. **Introdução à engenharia da confiabilidade**. Caxias do Sul: EDUCS, 2000.
- VACCARO, G. L. R. **Modelagem e Análise da Confiabilidade de Sistemas**. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 1997. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/128105/000199240.pdf?sequence=1>. Acesso em: 17 de jun. 2019.

SACRAMENTO, R. C. F. **Apostila de Transportadores de Correia**. Universidade Federal da Bahia – UFBA, pp. 20 – 47 Salvador – BA, 2010.

SANTI, A. M. M. **Co-incineração e co-processamento de resíduos industriais perigosos em fornos de clínquer**: investigação no maior pólo produtor de cimento do País, região metropolitana de Belo Horizonte, MG, sobre os riscos ambientais, e propostas para a segurança química. Tese Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2003.

SANTOS, M. M de M. et al. Modelagem do tempo de vida de um inversor de frequência. **ForScience**: revista científica do IFMG, Formiga, v. 5, n. 3, e00288, 2017.

SELLITTO, M. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Produção**, v. 15, n. 1, p. 44-59, 2005.

SILVA. 2007 Silva, Érica Santos. A indústria cimenteira baseada na ACV e na gestão energética / Érica Santos Silva. Brasília: UnB, 2017. N° de páginas p. 87: il.210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2017). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica.

SIQUEIRA, I. **Manutenção centrada na confiabilidade**: manual de implementação. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria Cimenteira. Relatório anual 2012 da indústria cimenteira. 2012.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria Cimenteira. Produção e Consumo de Cimento no Brasil. Disponível em: <https://www.cimentoverdedobrasil.com.br/producao-e-consumo-de-cimento-no-brasil>. 2016. Acesso em: 15 de jun. 2019.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria Cimenteira. Resultados Preliminares de Dezembro 2018. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=32>. Acesso em: 15 de jun. 2019.

SPINGARN, R. *Tutorial - Reliability data*. Reliability Review, v. 6, p. 10-12, March, 1986a.

FAÇO. “**Manual de Transportadores de Correia**”, 1996.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Gestão da Qualidade: Visão Estratégica: Módulo 4 - Plano de ação**.

CTB – **Ciência e Tecnologia da Borracha**. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/correias-transportadoras/ensaio-de-correias-transportadoras/>. 2010-2019. Acesso em: 15 de nov. 2019.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas – Uma Abordagem Integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013, 1004 p. ISBN 978-85-8260-023-8.

PALMA, D. C. **Metodologia de Simulação por Elementos Finitos de Polias para Transportadores de Correia de Grandes Capacidades Utilizando o Programa Ansys Workbench**. 2009. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CATÁLOGO: **RINGFEDER**. 2016

CATÁLOGO: **Rolamentos de esferas**, SKF, 2015.

CATÁLOGO: **Rolamentos N° P1102a**, NSK Brasil Ltda, 2013. 557p.

CEMA. **Transportadores de Correia para Materiais a Granel**. 7. ed, 2014. 898 p. ISBN 978-85-07-05181-7.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**. AMGH Editora, 2011.

BERTHOLDI, Caio Machado. **Optimização de tambor de transportador de correia. Insitituto de ensino, pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo-2016.

KLEINSORGE, Mila de Paula; GELAIS, Marcelo Alves; MARCONDES, Marcelo de Araújo PERTENCE, Antônio Eustáquio de Melo. **Desenvolvimento de uma metodologia para o cálculo analítico de tambores de transportadores de correia**.2015

COMIN, Alessandra Dassi. SALVADOR, José Luiz. **Metodologia de Otimização para dimensionamento de eixos de tambores utilizados em transportadores contínuos**. SATC – Educação e Tecnologia.

APÊNDICES

	Pág.
Apêndice A Planilha de Cálculos	118-120
Apêndice B Desenho Técnico do eixo	121-122

Apêndice A: Planilha de Cálculos

Sigla	Parâmetro	Unidade	Valor	Fórmula	Resultado	Observações
C	Capacidade Volumétrica	dm³	785,4	C= Cabela.V.K	785,4	
B	Largura da correia	pol	48			
dp	distância padrão do material à borda	pol	3,54	dp=0,055B+0,9	3,54	tabela 1.04 (3 colos, α=5 graus)
Cabela	Capacidade vol a uma velocidade de 1m/s	dm³	462			tabela 1.03
v	velocidade do transportador	m/s	2			Capacidade de Projeto - 1300 th Capacidade Nominal - 1100 th
K	fator de correção da capacidade de um transportador devido à inclinação (tabela 1.03)		0,85			
Q	capacidade de carga	th	1300	Q = C.v	1300	
γ	peso específico	dm³	1,45			
Fr	Força radial nos rolamentos	kgf	75,30853	$F_r = [(I_2 + (L_1)I_2 \cdot \text{sen}(\theta))] \cdot W_m \cdot a + W_b \cdot a \cdot W \cdot \gamma$	75,30886	
Wm	Peso do material da correia	Kg/m	180,05	$W_m = 0,277 \cdot Q \cdot v$	180,05	
Wb	peso da correia	Kg/m	26,85			tabela 1-27 FAÇD Relatório Mercúrio - Correia de Aramida: 26,85 kg/m (> valor da tabela 1-27 da FAÇD para correia do tipo Lona de 48" = 20,2kg/m)
Wr	peso do rolo	kgf	10,01			tabela 1.10
a	espalhamento entre rolete de carga	m	35			tabela 1.16 e valor coletado na área
β	ângulo de inclinação dos rolos laterais	°	35			
l	fator indicativo da potência do material sobre o rolo central (tabela 1.09)		0,16			
	Sen(θ)		0,32899			
Cd	carga dinâmica nos rolamentos	kgf	371,274	Cd=Fr.Sr	371,27	abaixo do recomendado na tabela 1-12
Sr	fator de segurança no rolamento		4,93	tabela 1-13 (rolamento 6205, 20000th)		Para o valor de Cd, verificar a série dos roletes na tabela-12 e se a carga que atua em seu eixo (Fr) é compatível com a máxima permitida na tabela 1-13 (40 rpm, que corresponde a 2m/s, e rolamento de esferas com vida útil estimada de 20000h - regime intermitente)
f	Flecha da correia	m	0,02	$f = \frac{[(W_m \cdot W_b) \cdot a] \cdot 10^{-3}}{20000}$	0,02	Valores recomendados para porcentagem de flecha de correia (tabela-16)
T0	tensões para garantir uma flecha mínima da correia entre os roletes	kgf	1291,875	$T_0 = 6,25 \cdot W_m \cdot W_b \cdot a$	1291,88	pg.147 - 2%; de flecha (escolhido T0 para a flecha das 2; (EOA) PPRÁ-TICA - recomendação pg.155)
Me	potência total efetiva (HP)	HP	112,98	$M_e = V \cdot (W_m \cdot W_b) \cdot Q \cdot 1000 \cdot (N_1 + W_b)$	112,98	
Me	potência total efetiva (CV)	CV	114,547	$M_e = V \cdot (W_m \cdot W_b) \cdot Q \cdot 1000 \cdot (N_1 + W_b)$		
i	rendimento total		0,93			tabela 1-34 (redução tripla)
Nu	potência do motor elétrico (HP)	HP	121,4533	$N_u = M_e / i$		
Nv	potência do motor elétrico (CV)	CV	123,1688			
Nv	potência para acionar o transportador vazio a uma vel de 1m/s	HP	3,23		3,23	tabela 1-17 (correia de 48" e comprimento de 80m; comprimento do TC= 71,06m)
N1	potência para deslocar 1000th de material de uma distância (L) na horizontal	HP	15		15	tabela 1-18 (valor para comprimento de 70m; comprimento do TC na horizontal= 68,97m)
Nh	potência para elevar ou descer 1000th de material de uma altura (H)	HP	6,5			Para H=17,1m (tabela - 17,5m)
Ng	potência para vencer atrito das guias laterais à vel de 1m/s	HP	1,26		2,52	tabela 1-20. Comprimento das guias: 3m (8m total)
Te	tensão efetiva na correia	kgf	4236,75	$T_e = 75 \cdot N_{eHF}$	4236,75	
Fr	força de atrito nos roletes de retorno	kgf	23,40624	$F_r = 0,015 \cdot L \cdot W_b$	23,40624	
K	fator de abragamento da correia no tambor de acionamento		0,35		0,35	tabela 1-28 (valores padrão quando α=0,35 para tambores revestidos com borracha)
K	fator de abragamento da correia no tambor de acionamento		#D W 01	$K = f_{exp} \cdot (0,0174 \cdot \frac{D}{W})^{1,1}$	#D W 01	fórmula aplicada para valores (ora do padrão) seguido na tabela 1-28
α	coeficiente de atrito					tabela-29
T1	tensão máxima da correia no tambor de acionamento	kgf	5720	$T_1 = (K \cdot T_e)$	5716,61	(1) A - pg 149
T2	tensão mínima no tambor de acionamento (A)	kgf	1493	$T_2 = K \cdot T_e$	1482,86	(1) A - pg 149
T3	tensão no tambor de retomoldobra (A)	kgf	1102	$T_3 = [K \cdot T_e] + F_r \cdot (H \cdot W_b)$	1102,48	(1) A - pg 149
T1	tensão máxima no tambor de acionamento (B)	kgf	5909,03	$T_1 = T_e + T_0 + H \cdot W_b + F_r$		Leva em consideração o Fr
T2	tensão mínima no tambor de acionamento (B)	kgf	1719	$T_2 = T_0 + H \cdot W_b + F_r$		Leva em consideração o Fr
T3	tensão máxima no tambor de retomoldobra (B)	kgf	1292	T3-T0		
T1	tensão máxima no tambor de acionamento	KN	56,1034	idem	56,1034	
T2	tensão mínima no tambor de acionamento	KN	14,54689	idem	14,54689	
T3	tensão no tambor de retomoldobra	KN	10,81603	idem	10,8161	
α	ângulo de inclinação máx. da correia	°	18			FAÇD 1045
m	massa do eixo	kg	167,17			
We	peso do eixo	KN	1,541638			
Rz	resultante de T3 em z	KN	6,943718			força deve estar no sentido negativo
Ry	resultante de T3 em y	KN	13,627891			força deve estar no sentido negativo
Rt	resultante radial no tambor (em função de Rz e Ry)	KN	15,29485			força deve estar no sentido negativo

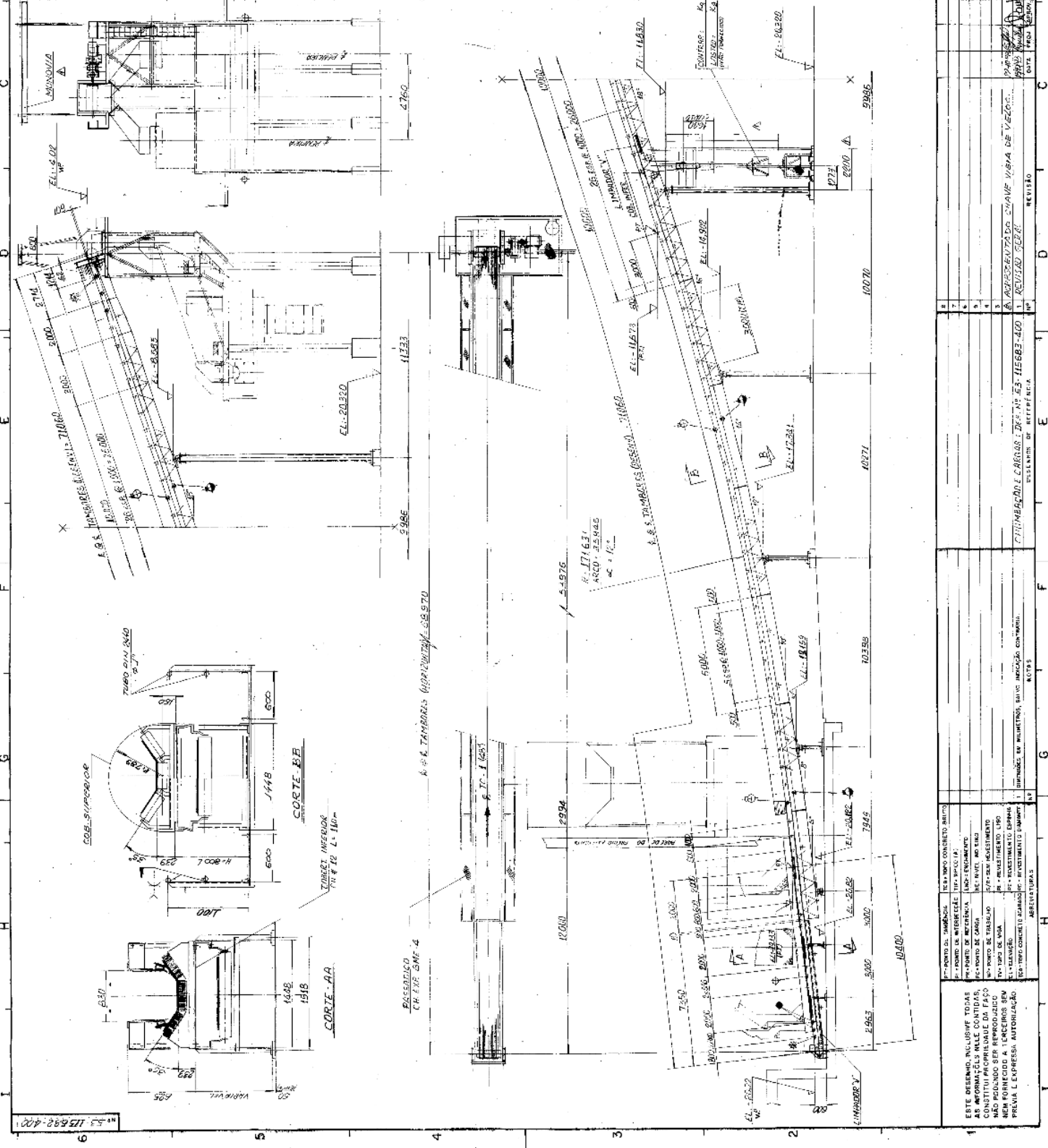
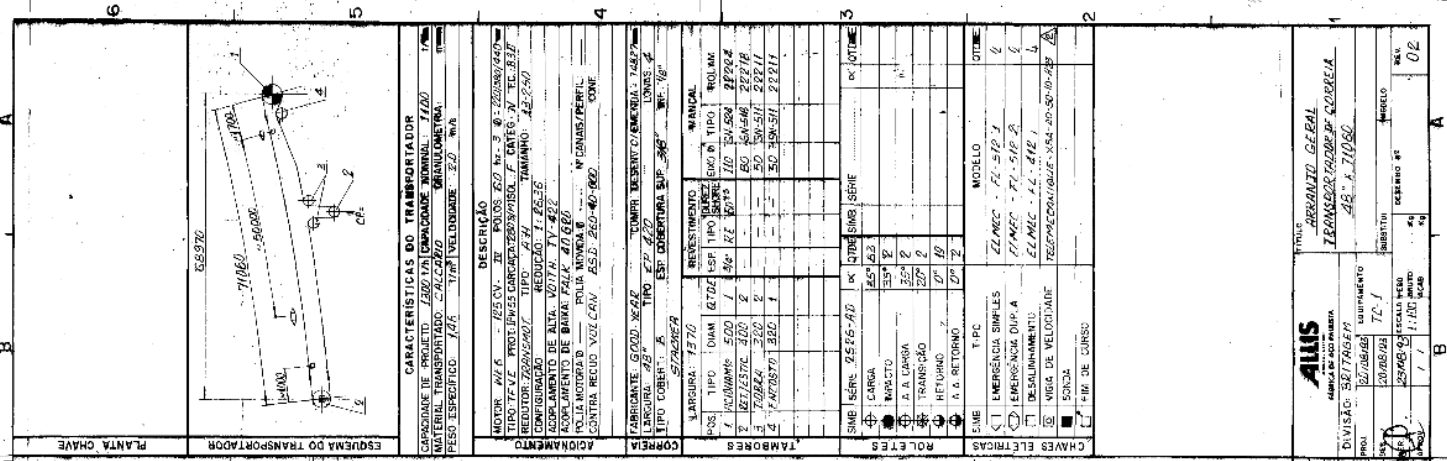
Re	resultante radial no eixo (kN)	kN	14,24639	$Re = ((F_{Rg} \cdot 2) \cdot H \cdot v_e^2) \cdot 2 \cdot F_{Rg} \cdot v_e \cdot \cos(45^\circ) \cdot (P/P) \cdot (R/100) \cdot (1/2)$	foi mantida formulação com sinais originais, levando-se em conta somente a intensidade das forças.
Pe	resultante radial no eixo (N)	N	14246,39		
d	diâmetro do tambor	mm	500		
L	distância entre mancais	mm	1700		
C	distância entre discos	mm	1300		
Ks	fator de serviço		1,5		
qadm	tensão admissível no eixo (kgf/cm ²)	kgf/cm ²	750		tabela L-30 em kgf/cm ² para aço 1040
qadm	tensão admissível no eixo (MPa ou N/mm ²)	MPa	73,54988		
E	módulo de Young	MPa	206000		Valor padrão para aços
M	momento fletor	N*mm	1424639	$M = (Re \cdot L \cdot C) / 4$	
d	diâmetro do eixo quanto as tensões	mm	66,6	$d = ((32 \cdot E \cdot M) / (P \cdot (T \cdot adm))) \cdot (1/3)$	
fmsk,t	flecha máxima em função do diâmetro do eixo dimensionado para tensões	mm	902	$d = ((2 \cdot 3) \cdot (Re \cdot L \cdot C) \cdot (P) \cdot (T \cdot adm)) \cdot (1/2) \cdot (L \cdot C) \cdot (C^2) \cdot (1/4)$	
fmsk,f	flecha máxima em função do diâmetro do eixo para a flecha max admissível	mm	3,79849	$f = ((2 \cdot 3) \cdot (Re \cdot L \cdot C) \cdot (P) \cdot (T \cdot adm)) \cdot (1/2) \cdot (L \cdot C) \cdot (C^2)$	
fmsk	flecha máxima admissível	mm	1,03333	$f = ((2 \cdot 3) \cdot (Re \cdot L \cdot C) \cdot (P) \cdot (T \cdot adm)) \cdot (1/2) \cdot (L \cdot C) \cdot (C^2)$	
Fr	carga radial resultante no mancal	N	1133333	$F_r = L \cdot P \cdot 100$	Valor para Ks=1, fórmula aplicada para L=64"
Fa	carga axial	N	712,3184		
n	rotação	rpm	70		
Lh	vida nominal	h	30000		
fn	coeficiente de vida (velocidade)		0,8		figura 5.3 - pg. A26 (NSK)
P	carga dinâmica equivalente	N	917,698		
X	fator de carga		1		Y= Y3 (pg. B183 - NSK)
Y	fator de carga		2,8		
fh	coeficiente de vida (horas)		0,24		
Cr	capacidade de carga básica	N	39320,03		figura 5.3 - pg. A26 (NSK)
d1	diâmetro interno do anel	mm	120		120 do catálogo da RINGFEDER modelo RFN 7012 (eixo com diâmetro de 120mm no centro)
L3	largura do anel cônico em contato com eixo/tubo	mm	26		26 do catálogo da RINGFEDER modelo RFN 7012 (eixo com diâmetro de 120mm no centro)
P1	pressão interna do anel (entre anel e eixo)	N/mm ²	214		214 do catálogo da RINGFEDER modelo RFN 7012 (eixo com diâmetro de 120mm no centro)
P	força exercida pelo anel no eixo	N	2097579	$P = P \cdot P \cdot (1) \cdot d \cdot L^3$	
teta	ângulo da força aplicada na sup. Do anel cônico (90-teta)		20		
	sen(90-teta)		70		
	sen(90-teta)		0,839683		
F	Força de aperto do parafuso	N	2232197	$F = P / (\text{sen}(90-teta))$	
			2232197		
CÁLCULO PARA SELEÇÃO DE ROLAMENTOS					
CÁLCULO DO ANEL DE PIRAÇÃO					

Apêndice B: Desenho Técnico do Eixo

ANEXOS

	Pág.	
Anexo I	Desenho de Arranjo do Transportador de Correia A1J05	124-125
Anexo II	Relatório de Inspeção do Transportador de Correia A1J05	126
Anexo III	Tabela de Equivalência de Correias	127
Anexo IV	Especificações Redutor FALK	128
Anexo V	Especificação de Rolamento – SKF - Rolamento	129
Anexo VI	Especificação de Rolamento – SKF - Mancal	130

ANEXO I: Desenho de Arranjo do Transportador de correia A1J05



CARACTERÍSTICAS DO TRANSPORTADOR	
RESERVARE DE PROJETO	2300 TA CAPACIDADE
USO	TRANSPORTE DE CARGA
PESO ESPECÍFICO	146
TIPO	VELOCIDADE 2,0 m/s

DESCRIÇÃO	
MOTOR	WEG 15 CV - 220V - 3 FOS - 220/240/260V
TIPO	7 F.V. PROT. FUSÍVELS CARGA 220/240/260V F. CAT. N. TC. B.F.F.
REDUTOR	ZANUSI 200/240/260V T.I.P.O. A.H. TAMANHO: A2.2-2.0
CONFIGURAÇÃO	REDUÇÃO 1:25.16
ACOMPANHAMENTO DE ALTA	10717 - 17.422
ACOMPANHAMENTO DE BAIXA	10718 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO	10719 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE BARRIL	10720 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10721 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10722 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10723 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10724 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10725 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10726 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10727 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10728 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10729 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10730 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10731 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10732 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10733 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10734 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10735 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10736 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10737 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10738 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10739 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10740 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10741 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10742 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10743 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10744 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10745 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10746 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10747 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10748 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10749 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10750 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10751 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10752 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10753 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10754 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10755 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10756 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10757 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10758 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10759 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10760 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10761 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10762 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10763 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10764 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10765 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10766 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10767 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10768 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10769 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10770 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10771 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10772 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10773 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10774 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10775 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10776 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10777 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10778 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10779 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10780 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10781 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10782 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10783 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10784 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10785 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10786 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10787 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10788 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10789 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10790 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10791 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10792 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10793 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10794 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10795 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10796 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10797 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10798 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10799 - 17.422
PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE TAMBORES	10800 - 17.422

ALUS
 EMPRESA DE ENGENHARIA
 DIVISÃO: 52749527
 PROJ: 200824
 SUBPROJETO: 72-1
 DATA: 25/08/99
 ESCALA: 1/50
 FOLHA: 02
 DESENHADO POR: [Assinatura]
 REVISADO POR: [Assinatura]
 PROJETO: [Assinatura]
 TÍTULO: TRANSPORTADOR DE CARGA

ESTE DESENHO, INCLUSIVE TODAS AS INFORMAÇÕES NELLE CONTIDAS, NÃO DEVE SER REPRODUZIDO SEM O CONSENTIMENTO PRÉVIO DA EMPRESA AUTORIZADA.

ESTE DESENHO, INCLUSIVE TODAS AS INFORMAÇÕES NELLE CONTIDAS, NÃO DEVE SER REPRODUZIDO SEM O CONSENTIMENTO PRÉVIO DA EMPRESA AUTORIZADA.

ESTE DESENHO, INCLUSIVE TODAS AS INFORMAÇÕES NELLE CONTIDAS, NÃO DEVE SER REPRODUZIDO SEM O CONSENTIMENTO PRÉVIO DA EMPRESA AUTORIZADA.

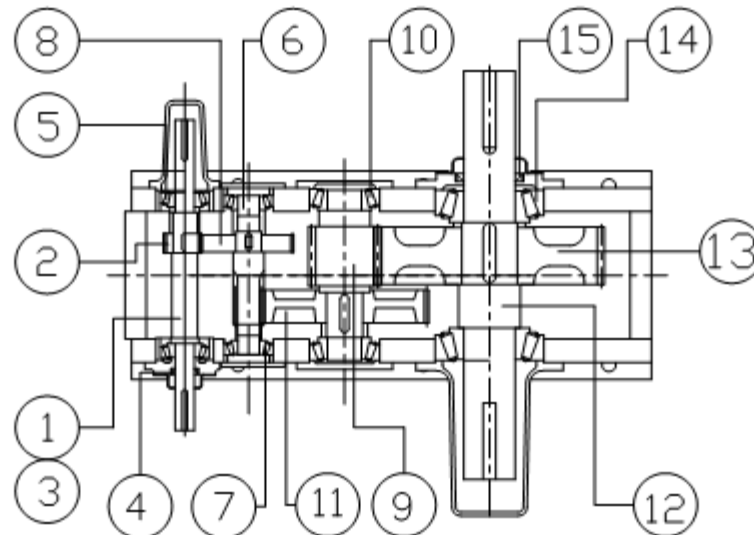
ANEXO II: Relatório de Inspeção do Transportador de Correia A1J05

Relatório Seletiva Correia Transportadora			
Area / setor			
TAG	A1J05	Descrição	Correia Transportadora calcário
Data	Técnica	Tipo de Inspeção	Inspetor
20/03/2019	Inspeção Seletiva	Seletiva Visual	
Criticidade	Data OS	Prazo Resolução (dias)	
Crítico	19/03/2019	Indefinido	
<p>Diagnósticos: Desalinhamento/Desgaste Acentuado/ Risco de Rasgamento</p> <p>Observação:</p> <ul style="list-style-type: none"> >Correia com marca preferencial de desgaste na longitudinal da cobertura inferior >Risco de rasgo na correia no longo prazo >Correia Desalinhada ><u>Correia foi montada como sentido de giro invertido</u> (existe seta mostrando o sentido de giro correto). <p>Recomendações de Serviço:</p> <ul style="list-style-type: none"> >Alinhar correia - O's - 147391955 			
<p>Retrabalho: <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/></p> <p style="text-align: center;">SIM NÃO</p>			
IMAGENS DA INSPEÇÃO			
			
			

Anexo III: Tabela de Equivalência de Correias

ESPEC.INTERNAC.	TENSÃO RUPTURA	QTD.	CARÇAÇAS - ESPECIFICAÇÕES EQUIVALENTES		
DIN22102	(N/mm)	LONAS			
CARÇAÇAS DE POLIÉSTER/NYLON			GOODYER	MERCÚRIO	MASTERPEN
EP 250/2	250	2	EP 140/2	2 PN 1200	PEN 140/2
EP 400/3	400	3	EP 140/3	3 PN 1200	PEN 140/3
EP 400/2	400	2	EP 220/2	2 PN 2200	PEN 220/2
EP 630/3	630	3	EP 220/3	3 PN 2200	PEN 220/3
EP 800/4	800	4	EP 220/4	4 PN 2200	PEN 220/4
EP 1000/3	1000	3	EP 320/3	3 PN 3000	PEN 320/3
EP 1250/4	1250	4	EP 320/4	4 PN 3000	PEN 320/4
EP 1250/3	1250	3	EP 420/3	3 PN 4000	PEN 420/3
EP 1600/4	1600	4	EP 420/4	4 PN 4000	PEN 420/4
EP 2000/4	2000	4	EP 500/4	4 PN 5000	PEN 500/4
EP 2500/5	2500	5	EP 500/5	5 PN 5000	PEN 500/5
CARÇAÇAS DE NYLON/NYLON					
SNNPP 315/2	315	2	PLYLON 140	2 NN 700	SNN 2/250
PP 500/2	500	2	PLYLON 220	2 NN 1100	SNN 2/400
PP 630/3	630	3	PLYLON 330	3 NN 1100	SNN 3/600
PP 1000/4	1000	4	PLYLON 440	4 NN 1100	SNN 4/800
PP 1000/3	1000	3	PLYLON 540	3 NN 1800	SNN 3/980
PP 1400/4	1400	4	PLYLON 720	4 NN 1800	SNN 1/1300
COBERTURAS - ESPECIFICAÇÕES EQUIVALETES					
APLICAÇÃO			GOODYEAR	MERCÚRIO	MASTERPEN
Super Extra Abrasão			GLOBAL X / GRADE A	EAS	-----
Extra Abrasão - RMA Grau I			STACKER	EA	MASTER
Alta Abrasão - RMA Grau II			B	AB	GENERAL
Abrasão e ação química (fertilizantes)			B-REAÇÃO	AB-REAÇÃO	-----
Óleo e Ácidos			ORS CHEMIGUM	OAN	NOR
Óleo e Ácidos - Temp. 120°C			ORS WINGPRENE	-----	RTA
Abrasão, impacto e resinas			SURPASS	EAR	-----
Óleo, anti-estático e anti-chama			PATHFINDER	TG/TGS	NORII
Temperatura até 150 °C			6740-A	AT	TYA
Temperatura até 204 °C			THERMOSHIELD	ATS	STYA
Atóxica e sanitária			-----	SAS	SUG
Atóxica, sanitária e abrasão			-----	-----	SUPER SUG
Óleos e ácidos cítricos			ORS CHEMIVIC	-----	-----

Anexo IV: Especificações Redutor FALK



Cliente:

Att.:

Fax.:

Redutor (modelo): AH13-250E 1:26,36 FIG.1A

RG.: 216804

ITEM	DENOMINAÇÃO	QUANT.	REFERÊNCIA
1	EIXO DE AR	N/A	N/A
2	PINHÃO DE AR	N/A	N/A
3	EIXO PINHÃO DE AR	1	6523187 Z= 27
4	RETENTOR DE AR	1	50,00x65,00x8,00
5	ROLAMENTO DE AR	2	33210
6	EIXO INTERMEDIÁRIO	1	6422223 Z= 15
7	ROLAMENTO INT.	2	32310J2/Q
8	ENGRENAGEM DE AR	1	6420364 Z= 41
9	PINHÃO DE BR	1	6422183 Z= 15
10	ROLAMENTO PINHÃO BR	2	32316
11	ENGRENAGEM INT.	1	6420390 Z= 62
12	EIXO DE BR	1	6420104
13	ENGRENAGEM DE BR	1	6420411 Z= 63
14	ROLAMENTO DE BR	2	32324
15	RETENTOR DE BR	1	115,00x140,00x12,0

OBSERVAÇÃO:

Anexo V: Especificação de Rolamento – SKF - Rolamento

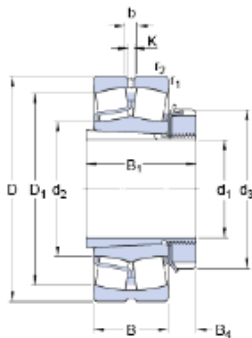
SKF



22220 EK + H 320

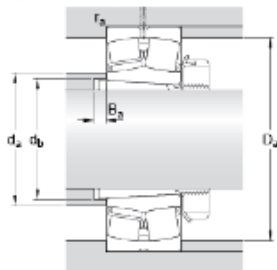
Item popular
SKF Explorer

Dimensões



d_1	90	mm
D	180	mm
B	46	mm
d_2	≈ 118	mm
d_3	130	mm
D_1	≈ 159	mm
B_1	71	mm
B_4	20	mm
b	8.3	mm
K	4.5	mm
$r_{1,2}$	min. 2.1	mm

Dimensões do encosto



d_a	max. 118	mm
d_b	min. 108	mm
D_a	max. 168	mm
B_a	min. 8	mm
r_a	max. 2	mm

Dados de cálculo

Classificação de carga dinâmica básica	C	433	kN
Classificação de carga estática básica	C_0	490	kN
Limite de carga de fadiga	P_u	49	kN
Velocidade de referência		3400	r/min
Velocidade-limite		4500	r/min
Fator de cálculo	e	0.24	
Fator de cálculo	Y_1	2.8	
Fator de cálculo	Y_2	4.2	
Fator de cálculo	Y_0	2.8	

Massa

Rolamento incluindo a bucha	6.4	kg
-----------------------------	-----	----

Anexo VI: Especificação de Mancal – SKF - Mancal

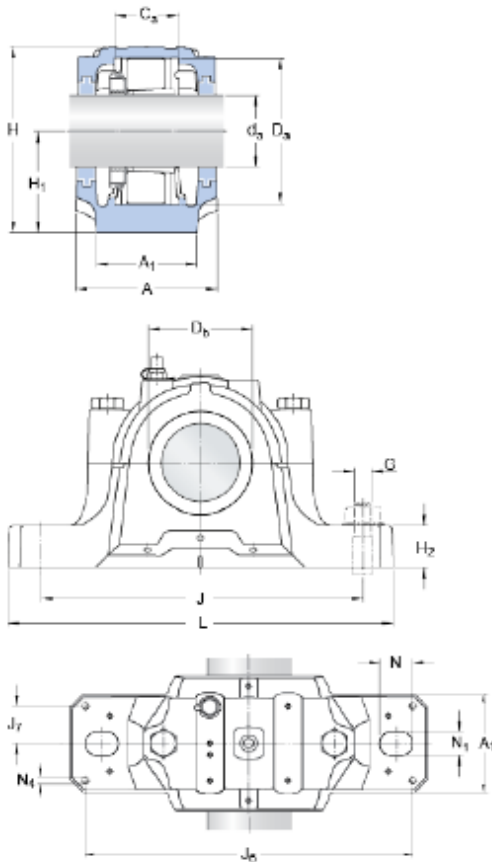
SKF

SNL 520-617

Appropriate products

Bearing (basic designation)	21317 K
Adapter sleeve	HA 317
Locating ring	2 x FRB 14.5/180

Dimensions



d_a	74.612	mm
C_a	70	mm
D_a	180	mm
D_b	137.5	mm
A	160	mm
A_1	110	mm
H	218	mm
H_1	112	mm
H_2	40	mm
J	320	mm
L	380	mm
N	32	mm
N_1	26	mm

Dowel pins

J_6	348	mm
J_7	39	mm
N_4	max. 8	mm

Seal dimensions

A_{2L}	178	mm
----------	-----	----

Appropriate seals and end cover

