

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

**IURI PINHEIRO DE SANT'ANNA**

**ANÁLISE DOS DADOS DE VIDA DO ROLAMENTO DE GIRO DA  
TORRE DE UMA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2017**

**IURI PINHEIRO DE SANT'ANNA**

**ANÁLISE DOS DADOS DE VIDA DO ROLAMENTO DE GIRO DA  
TORRE DE UMA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

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

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rigoni

**CURITIBA**

**2017**



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica  
Especialização em Engenharia da Confiabilidade



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### ANÁLISE DOS DADOS DE VIDA DO ROLAMENTO DE GIRO DA TORRE DE UMA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO

por

IURI PINHEIRO DE SANT'ANNA

Esta monografia foi apresentada em 10 de novembro de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

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

---

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.  
Membro Titular da Banca - UTFPR

---

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

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

Dedico esse trabalho a minha família, que sempre apoiou e incentivou meus estudos e também foi compreensiva nos meus momentos de ausência. Sem esse apoio, essa conquista não teria sido possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Emerson Rigoni, que com muito profissionalismo me direcionou na elaboração desta monografia.

A todos os professores, que durante o curso não mediram esforços para nos transmitir os seus conhecimentos.

Aos meus gestores da ArcelorMittal Tubarão que acreditaram no meu potencial ao me indicarem para a participação desta especialização.

Aos meus colegas de sala por compartilharem os seus conhecimentos e experiências durante o curso, o que contribuiu para que ele fosse ainda mais proveitoso. E, além disso, fizeram com que esse período fosse prazeroso, pois o relacionamento da turma foi bastante amigável.

## RESUMO

SANT'ANNA, Iuri Pinheiro de. **Análise dos Dados de Vida do Rolamento de Giro da Torre de uma Máquina de Lingotamento Contínuo**. 2017. 66 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

A crescente busca por redução de custos tem levado as empresas a praticarem cada vez mais uma melhor gestão dos seus ativos. Dentro de uma unidade de Lingotamento Contínuo, um dos componentes mais importantes é o Rolamento de giro da Torre de Panela, que possui em torno de 5 metros de diâmetro, pesa aproximadamente 7 toneladas, custa por volta de R\$ 1 milhão e para sua troca são necessários dez dias de parada de produção. Esse estudo se propõe a analisar os dados de vida dos rolamentos da planta da ArcelorMittal Tubarão. Para isso, será utilizado um software que irá auxiliar na identificação do modelo probabilístico que melhor representa os dados existentes considerando as falhas e os dados censurados e permitirá obter importantes informações para a tomada de decisão em relação a este componente. Será calculada a confiabilidade do componente para um determinado período, identificada se as falhas estão ocorrendo por mortalidade infantil ou por velhice e determinado o melhor momento para a reposição do estoque do componente. Todos os resultados obtidos serão considerados para se definir a melhor estratégia de gestão deste componente.

**Palavras-chave:** Confiabilidade. Análise de Dados de Vida. Rolamento de Giro. Lingotamento Contínuo.

## ABSTRACT

SANT'ANNA, Iuri Pinheiro de. **Life Data Analysis of Slewing Bearings of Continuous Casting Machine Ladle Turret**. 2017. 66 sheets. Monograph (Specialization Course in Reliability Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

The growing demand for cost reduction has led companies to increasingly do a better management of their assets. Within a Continuous Casting unit, one of the most important components is the slewing bearing of the ladle tower, which is about 5 meters in diameter, weighs approximately 7 tons, costs around R\$ 1 million and for its exchange it takes ten days of production stoppage. This study proposes to analyze the life data of the bearings of the ArcelorMittal Tubarão plant. For this, a software will be used to help identify the probabilistic model that best represents the existing data considering the faults and the censored data and will allow to obtain important information for the decision making in relation to this component. The reliability of the component will be calculated for a given period, identified if the failures are occurring due to infant mortality or old age, determined the necessary inventory and made the budget forecast for component replacement. The reliability of the component will be calculated for a given period, it will be identified if the failures are occurring due to infant mortality or old age, and the best time will be determined for the replacement of the component stock. All the results obtained will be considered in order to define the best management strategy for this component.

**Keywords:** Reliability. Life Data Analysis. Turning Bearing. Continuous Casting.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tela do sistema supervisorio.....	20
Figura 2.2 – Vista explodida da Torre de Panela .....	22
Figura 2.3 – Cronograma para troca do Rolamento da Torre.....	28
Figura 3.1 – Dados censurados a esquerda.....	32
Figura 3.2 – Dados censurados em intervalos .....	33
Figura 3.3 – Dados censurados a direita.....	34
Figura 3.4 – Exemplo de histograma com intervalos a cada 50 unidades de tempo.....	35
Figura 3.5 – Histograma com intervalos reduzidos para 25 unidades de tempo .....	35
Figura 3.6 – Função Densidade de Probabilidade .....	36
Figura 3.7 – Função Densidade de Probabilidade com intervalos tendendo a zero.....	36
Figura 3.8 – Área sob a curva é igual a integral da PDF .....	37
Figura 3.9 – Definição matemática da PDF.....	37
Figura 3.10 – Área sob a PDF .....	38
Figura 3.11 – Representação da CDF.....	39
Figura 3.12 – Relação entre a probabilidade de falha (não confiabilidade) e a probabilidade de sucesso (confiabilidade).....	40
Figura 3.13 – Influência de $\beta$ nas funções de confiabilidade de Weibull-2P.....	44
Figura 3.14 – Relação entre $\beta$ e a curva da banheira .....	45
Figura 3.15 – Influência de $\eta$ na função confiabilidade.....	46
Figura 3.16 – Influência de $\gamma$ na função confiabilidade.....	46
Figura 3.17 – Curva da distribuição Log-normal.....	49
Figura 4.1 – Confiabilidade para 8, 10, 12 e 14 anos.....	56
Figura 4.2 – Confiabilidade condicional para o Rolamento da Máquina 03.....	57
Figura 4.3 – Vida BX% para 25%, 50% e 75% dos Rolamentos.....	57
Figura 4.4 – Vida média dos Rolamentos.....	58
Figura 4.5 – Detalhe do FMEA da Torre de Giro, relativo a potenciais falhas na montagem do Rolamento .....	59
Figura 4.6 – Intervalo P-F da falha do Rolamento da Máquina 01 em 2003 .....	61
Figura 4.7 – Intervalo P-F da falha do Rolamento da Máquina 02 em 2008 .....	62
Figura 4.8 – Intervalo P-F da falha do Rolamento da Máquina 02 em 2016 .....	62



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Função Densidade de Probabilidade (PDF).....	53
Gráfico 4.2 – Função Probabilidade de Falha .....	54
Gráfico 4.3 – Função Confiabilidade $R(t)$ .....	54
Gráfico 4.4 – Função Taxa de Falha ( $\lambda$ ).....	55
Gráfico 4.5 – Dados analisados na linha do tempo – falha ou suspensão .....	55

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Desenho 2.1 – Vista lateral da Torre, com a identificação de alguns dos seus principais componentes.....	21
Desenho 2.2 – Vista superior da torre, com a identificação de alguns dos seus principais componentes.....	21
Desenho 2.3 – Detalhe do Rolamento de giro da Torre de Panela .....	25
Fotografia 2.1 – Vista lateral da Torre de Panela .....	20

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> Função Distribuição Acumulada
FM	<i>Fisher Matrix</i> Matriz de Fisher
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i> Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> Tempo médio entre falhas
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i> Tempo médio até a falha
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> Agência Aeroespacial Norte Americana
NBR	Norma Brasileira aprovada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas
NLRR	<i>Non Linear Rank Regression</i> Regressão do Ranque Não Linear
PDF	<i>Probability Density Function</i> Função Densidade de Probabilidade
P-F	Intervalo de tempo entre a detecção do início da falha em potencial até a falha ocorrer de fato
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i> Manutenção Centrada em Confiabilidade

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f(x)$  – Função Densidade de Probabilidade

$A$  – Área

$R(t)$  – Função Confiabilidade (Probabilidade de sucesso)

$F(t)$  – Função Desconfiabilidade (Probabilidade de insucesso)

$Q(t)$  – Função Não-Confiabilidade

$\lambda(t)$  – Função Taxa de falha

Vida  $BX\%$  – Vida em que  $X\%$  das unidades falham

$\beta$  – Parâmetro de Forma

$\eta$  – Parâmetro de Escala ou Vida Característica

$\gamma$  – Parâmetro de Localização ou Vida Mínima

$\Gamma$  – Função Gama

$T'$  – logaritmo natural do tempo até a falha

$\mu'$  – média do logaritmo natural dos tempos até a falha

$\sigma'$  – desvio padrão do logaritmo natural dos tempos até a falha

$\rho$  – Coeficiente de Correlação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA .....	15
1.2	OBJETIVOS .....	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos .....	16
1.3	JUSTIFICATIVA .....	16
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	17
<b>2</b>	<b>TORRE DE PANELA .....</b>	<b>19</b>
2.1	PRINCIPAIS COMPONENTES .....	19
2.2	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS.....	22
2.3	FUNCIONAMENTO.....	24
2.4	O ROLAMENTO DE GIRO DA TORRE DE PANELA .....	25
2.4.1	Projeto .....	25
2.4.2	Procedimento para troca do Rolamento .....	26
2.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	29
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DE DADOS DE VIDA .....</b>	<b>30</b>
3.1	TIPOS DE VARIÁVEIS .....	30
3.1.1	Variável Aleatória Discreta .....	31
3.1.2	Variável Aleatória Contínua.....	31
3.2	TIPOS DE DADOS .....	31
3.2.1	Dados Completos.....	32
3.2.2	Dados Censurados.....	32
3.2.2.1	Dados Censurados a Esquerda.....	32
3.2.2.2	Dados Censurados em Intervalos .....	33
3.2.2.3	Dados Censurados a Direita (Suspensos) .....	33
3.3	PRINCIPAIS FUNÇÕES APLICADAS À CONFIABILIDADE.....	34
3.3.1	A Função Densidade de Probabilidade (PDF) – $f(x)$ .....	34
3.3.2	A Função Distribuição Acumulada (CDF) – $F(x)$ .....	38
3.3.3	A Função Confiabilidade – $R(t)$ .....	39
3.3.4	A Função Taxa de Falha – $\lambda(t)$ .....	41
3.3.5	A Função Vida Média – MTTF (Mean Time To Failure) .....	41
3.4	PRINCIPAIS DISTRIBUIÇÕES APLICADAS À CONFIABILIDADE .....	42
3.4.1	A Distribuição Weibull.....	42
3.4.2	A Distribuição Exponencial.....	47
3.4.3	A Distribuição Log-normal .....	48
3.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	49
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>51</b>
4.1	COLETA DOS DADOS.....	51
4.2	RESULTADOS OBTIDOS DE CONFIABILIDADE .....	52

4.3	SIMULAÇÕES .....	56
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	58
4.4.1	O Coeficiente de Correlação – $\rho$ .....	58
4.4.2	O Parâmetro de forma – $\beta$ .....	59
4.4.3	O Parâmetro de escala (vida característica) – $\eta$ .....	60
4.4.4	O Parâmetro de localização (vida mínima) – $\gamma$ .....	60
4.4.5	Análises Complementares.....	61
4.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>64</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A manutenção vem deixando de ser vista como um mal necessário e está passando a ser considerada estratégica no meio empresarial. Essa mudança está ocorrendo porque as empresas estão percebendo que a manutenção é uma peça chave na gestão dos seus ativos e ela pode influenciar fortemente no seu resultado financeiro e operacional se for realizada de forma competente e com as metodologias adequadas.

Esse trabalho demonstrará uma análise realizada em um dos principais componentes de uma unidade de Lingotamento Contínuo de placas de aço. Trata-se do rolamento de giro da Torre de Panela, que possui um prazo de fabricação de oito meses, preço aproximado de um milhão de reais, pesa em torno de sete toneladas e meia e para a sua troca são necessários dez dias de máquina parada, o que representa uma perda significativa de produção da unidade.

Com base nas análises das falhas ocorridas no passado e as melhorias implantadas nos processos, também será analisado como a confiabilidade vem aumentando ao longo do tempo.

### 1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

Devido a relevância deste componente, esse trabalho será focado em analisar os dados de vida dos rolamentos da unidade de Lingotamento Contínuo de placas da ArcelorMittal Tubarão, localizada no município de Serra-ES.

Atualmente, não há uma análise de confiabilidade quantitativa dos dados de falha desse rolamento e, portanto, não existe um estudo que sustente as decisões da manutenção em relação a este componente. Normalmente essas decisões são tomadas baseadas no sentimento e na experiência das pessoas, o que muitas vezes não resulta na melhor alternativa.

## 1.2 OBJETIVOS

Os próximos itens apresentam os objetivos deste trabalho:

### 1.2.1 Objetivo Geral

Definir a melhor estratégia de manutenção para os Rolamentos das Torres das Máquinas de Lingotamento Contínuo da ArcelorMittal Tubarão com base na análise dos Dados de Vida destes componentes.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Fazer um levantamento de dados de todas as falhas dos Rolamentos de Torre ocorridas desde o início de operação das máquinas de Lingotamento Contínuo.
- Inserir esses dados em um software específico para conhecer o modelo probabilístico das falhas.
- Baseado nesse modelo, obter informações relevantes sobre o componente, como a probabilidade de falha para um determinado período, a confiabilidade para uma vida determinada, a taxa de falha no tempo, probabilidade condicional, MTTF, Vida Mediana, etc.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Possibilitar que decisões sobre esse ativo sejam tomadas de forma mais fundamentada e não somente pelo sentimento. Isso poderá melhorar a gestão sobre esse ativo e gerar algum ganho financeiro para a empresa, como por exemplo, fazer a aquisição do sobressalente no momento mais oportuno.



## 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para essa análise, será feito um levantamento dos dados de falha e suspensão já existentes no histórico da planta, que são muito confiáveis. Esses dados estão disponíveis no sistema de gestão da manutenção através de relatórios detalhados de cada intervenção para a troca dos rolamentos.

Os dados serão processados no software Weibull++ versão 11 da ReliaSoft para a obtenção dos resultados esperados. Esse software foi adquirido pela empresa em 2016 e está disponível em nossa rede corporativa para utilização.

Dependendo do resultado da análise estatística, também serão utilizados os relatórios das análises de falhas ocorridas e também a elaboração de uma Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) para auxiliar na definição da melhor estratégia de manutenção desse componente.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 01 estão apresentados os objetivos geral e específicos traçados para essa análise, além da justificativa para a sua realização e a metodologia que será utilizada no desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 02 descreve detalhadamente o equipamento Torre de Panela, com seus principais componentes, suas características técnicas e o seu funcionamento. O Rolamento de Giro, que é o principal componente da Torre de Panela e o objeto dessa monografia será detalhado no item 2.4 para que seja bem entendida a sua importância no contexto.

O capítulo 03 apresenta o referencial teórico aplicável ao trabalho, abordando conceitos de estatística e também de engenharia de confiabilidade. São mostrados os tipos de variáveis e os tipos de dados utilizados em uma análise de dados de vida. Também são mostradas as principais funções matemáticas da engenharia de confiabilidade, explicando de onde elas surgem, por que são importantes e como as utilizaremos para realizar cálculos de confiabilidade. Ainda neste capítulo, são apresentadas as distribuições estatísticas mais utilizadas na

confiabilidade, em que condições cada uma pode ser aplicada, suas características e a importância dos seus parâmetros e o que eles representam.

O capítulo 04 apresenta o desenvolvimento do trabalho, abordando como os dados foram coletados e o nível de confiança dessa coleta. Em seguida, explica como eles foram tratados estatisticamente e quais foram os resultados obtidos. Uma análise detalhada desses resultados é feita, abordando o modelo probabilístico escolhido e os valores encontrados para os seus parâmetros e também os resultados de confiabilidade simulados.

O capítulo 05 apresenta as conclusões do trabalho, avaliando se atingiram os objetivos traçados. Também são feitas sugestões para trabalhos futuros relativos ao mesmo tema.

## 2 TORRE DE PANELA

Este capítulo descreve o equipamento Torre de Panela, com seus principais componentes, suas características técnicas e o seu funcionamento. O Rolamento de Giro, que é o seu principal componente e o objeto dessa monografia, será detalhado no item 2.4.

A Torre de Panela é um equipamento de fundamental importância em uma planta de Lingotamento Contínuo. Ela é a responsável por receber a panela cheia de aço líquido da Aciaria e fazer o seu giro para a posição de vazamento na máquina de Lingotamento Contínuo. A seguir, será feita uma descrição deste equipamento, mostrando também o local onde o Rolamento é montado e a sua relevância para a planta.

### 2.1 PRINCIPAIS COMPONENTES

Os principais componentes da Torre de Panela são:

- 01 Estrutura inferior fixa;
- 01 Estrutura superior giratória;
- 01 Rolamento de giro (objeto desta monografia) montado entre essas duas estruturas, que permite o giro da superior;
- 01 Sistema de acionamento de giro, com motor, redutor e pinhão;
- 01 Sistema de giro de emergência pneumático;
- 01 Sistema pneumático para possibilitar o travamento do giro da Torre;
- 01 Sistema de lubrificação a graxa para o rolamento de giro e o pinhão;
- 02 Braços de elevação;
- 04 Berços para apoio da panela (2 berços em cada braço);
- 02 Cilindros hidráulicos para a movimentação vertical dos braços;
- 01 Conjunto de componentes elétricos;

A Fotografia 2.1 mostra uma vista lateral da Torre de Panela, com uma panela sendo colocada pela Ponte Rolante na posição de recebimento e a outra panela na posição de lingotamento.

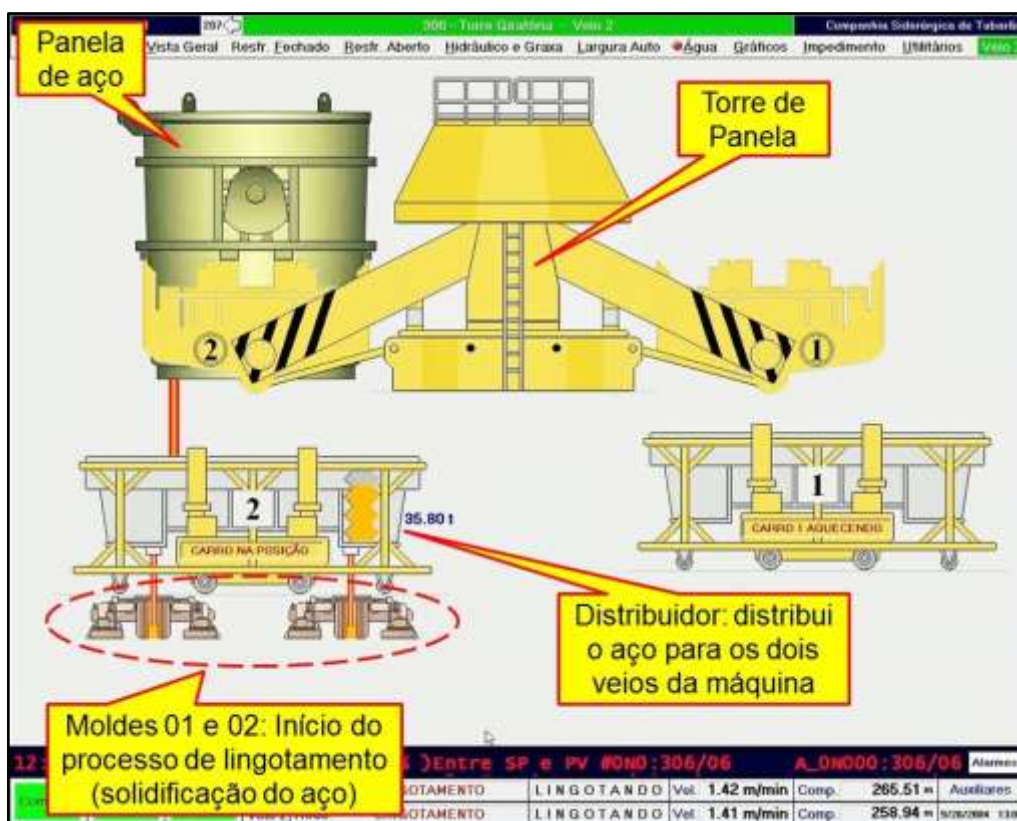
Fotografia 2.1 – Vista lateral da Torre de Panela



Fonte: o autor (2017).

A Figura 2.1 mostra a tela do sistema supervisório do Lingotamento Contínuo da ArcelorMittal Tubarão, com a Torre suportando uma Panela no braço 2.

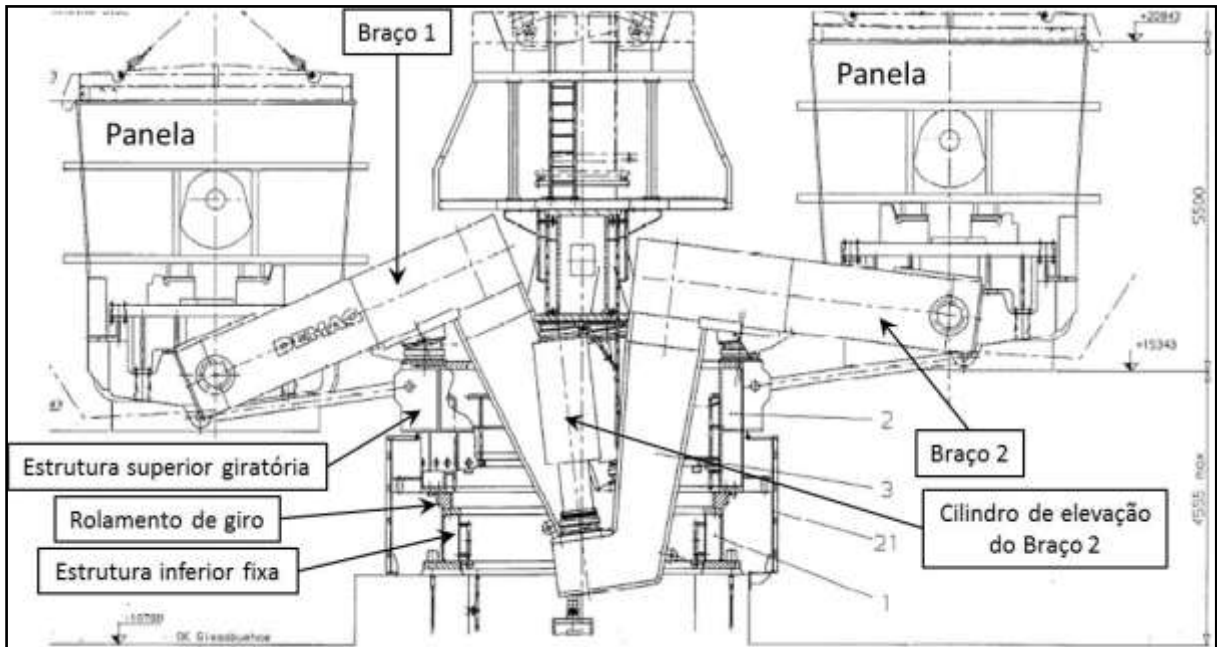
Figura 2.1 – Tela do sistema supervisório



Fonte: o autor (2017).

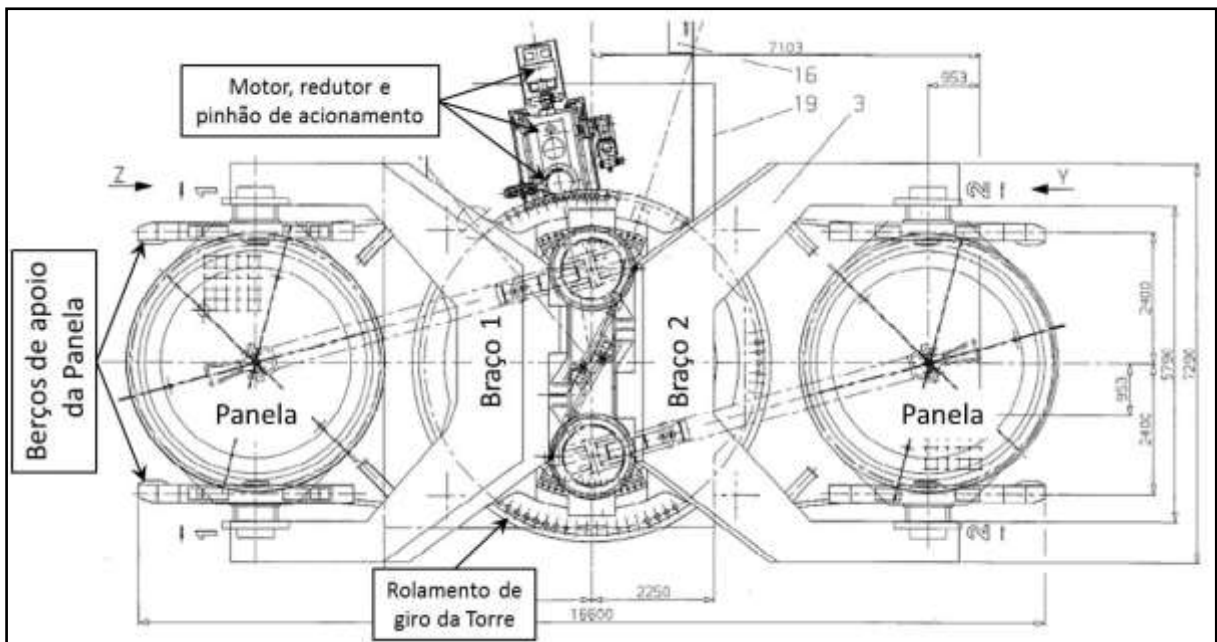
Os Desenhos 2.1 e 2.2 mostram a Torre, em vistas lateral e superior.

Desenho 2.1 – Vista lateral da Torre, com a identificação de alguns dos seus principais componentes



Fonte: Centro de Documentação e Informações Técnicas (CDI) da ArcelorMittal Tubarão (2017).

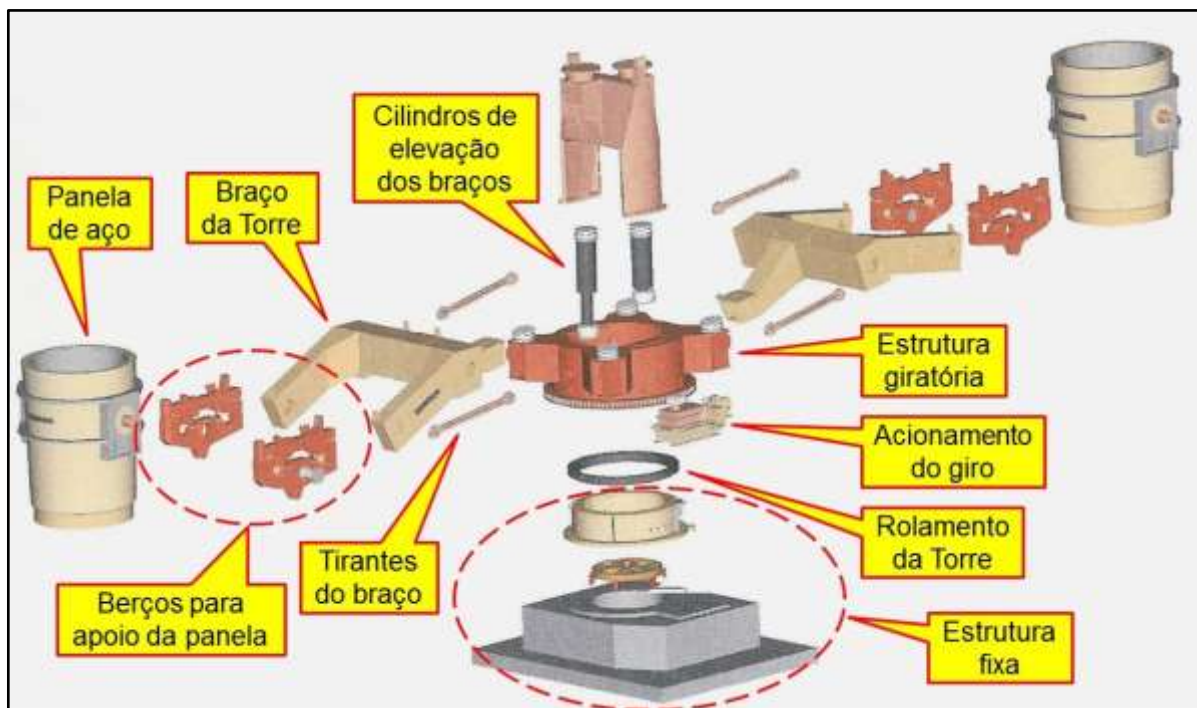
Desenho 2.2 – Vista superior da torre, com a identificação de alguns dos seus principais componentes



Fonte: Centro de Documentação e Informações Técnicas (CDI) da ArcelorMittal Tubarão (2017).

Para facilitar ainda mais o entendimento, a Figura 2.2 mostra um desenho em três dimensões, com uma vista explodida dos componentes da Torre.

Figura 2.2 – Vista explodida da Torre de Panela



Fonte: o autor (2017).

Expostos os principais componentes, a seguir serão apresentadas as suas principais características.

## 2.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

A Torre de Panela é um equipamento projetado para suportar, girar e movimentar verticalmente duas Painelas cheias de aço líquido. O peso próprio da Panela é de 155 tf e a carga de aço líquido é de aproximadamente 315 tf, totalizando um peso de 470 tf para cada panela.

A Torre é formada por uma estrutura inferior fixa e outra superior giratória. O componente que faz a conexão entre essas duas estruturas é o Rolamento de giro da Torre, objeto desta monografia, que será detalhado no item 2.4.

A estrutura superior giratória possui uma série de pinos distribuídos ao longo da sua circunferência que, quando acionados pelo pinhão, permitem a realização do seu giro.

Para fazer o acionamento do giro da Torre há um sistema composto por um motor elétrico de corrente alternada de 55 kW, um redutor de velocidades e um pinhão, que é acoplado nos pinos já descritos no parágrafo anterior.

A Torre é construída de aço estrutural soldado e a sua rigidez é tão alta que a posição do fundo da Panela é praticamente a mesma, independente dela estar cheia de aço líquido ou vazia.

Cada Panela é apoiada em um braço da Torre que, por sua vez, possui dois berços. Esses são conectados à estrutura da Torre através de tirantes, que garantem que o berço sempre permaneça na posição horizontal.

Cada um dos braços da Torre possui um sistema de elevação e esses operam de forma independente. Esse sistema é hidráulico e um cilindro de elevadas dimensões é responsável pela movimentação vertical de cada braço. Esses dois cilindros ficam localizados no interior da Torre, de cabeça para baixo, em uma posição próxima a vertical e possuem curso de 1000 mm.

Um sistema de controle composto por chaves limites permite que a estrutura superior giratória pare na posição correta de lingotamento. Nesse momento, um dispositivo de segurança trava a Torre nessa posição. Esse dispositivo é composto por uma cunha, acionada por um cilindro pneumático.

A Torre possui um anel coletor rotativo para poder fornecer circuitos de potência, controle e iluminação para a estrutura superior giratória. Também possui uma junta rotativa para suprir potência hidráulica e utilidades para a estrutura superior giratória.

Um sistema de giro de emergência pneumático, que funciona com ar comprimido ou argônio pode ser acionado no caso de falta de energia elétrica para o giro da Torre. Esse sistema, quando acionado, funciona com o ar comprimido da rede, que aciona o motor pneumático e também libera o freio do sistema de giro. Caso a linha de ar comprimido esteja com baixa pressão, automaticamente a linha é alimentada com um tanque de argônio com alta pressão e dedicado a esse sistema de emergência, que fará as mesmas funções já descritas acima pelo ar comprimido. Esse sistema é capaz de girar a Torre na sua carga máxima por, pelo menos, uma rotação de 360 graus na velocidade de 0,5 rpm. Esse sistema de emergência

possibilita o giro da Torre até que a Panela seja posicionada sobre a Panela de Emergência para descarregar o aço, caso haja algum problema que impossibilite o fechamento da válvula gaveta da Panela.

A Torre ainda possui mantas de proteção contra o calor irradiado pela panela.

### 2.3 FUNCIONAMENTO

Durante o vazamento do aço líquido para a máquina de Lingotamento Contínuo, a Torre não gira, ela permanece parada por meio do sistema de trava. O tempo de vazamento de uma Panela não é fixo, podendo variar de 35 a 80 minutos dependendo das dimensões da placa lingotada que está sendo produzida e das condições operacionais. Em média, uma panela é vazada a cada 60 minutos.

Pouco antes do final do vazamento de uma Panela, uma outra é colocada no outro braço da Torre por uma ponte rolante. Quando o aço do interior da Panela está quase no final, a sua válvula gaveta é fechada, interrompendo o vazamento. Nesse momento, a Torre eleva a Panela, a trava do giro é liberada, a Torre gira, a Panela vazia vai para a posição de carregamento, enquanto a Panela cheia é colocada na posição de Lingotamento. Nessa posição, o sistema de giro é novamente travado e um tubo de material refratário, chamado Válvula Longa, é acoplado na válvula gaveta da Panela. Em seguida, a Panela é movimentada para baixo e a válvula gaveta da panela é aberta, iniciando o vazamento de aço líquido da Panela.

Todo esse processo de troca de Panela, entre o fechamento da Panela vazia e a abertura da Panela cheia dura aproximadamente 2 minutos. Durante esse período, não há interrupção da produção porque há uma reserva de aço líquido sob a Panela, em um equipamento chamado de Distribuidor, que basicamente, é uma caixa metálica revestida de material refratário. Concluindo-se o vazamento desta Panela, outra Panela cheia é colocada no braço da Torre que está na posição de carregamento e o ciclo se repete.

A panela vazia, que foi girada para a posição de carregamento é retirada pela Ponte Rolante e devolvida para a Aciaria. Lá, ela será novamente carregada de



aço líquido pelo Convertedor e retornará para o Lingotamento Contínuo, fazendo o seu ciclo.

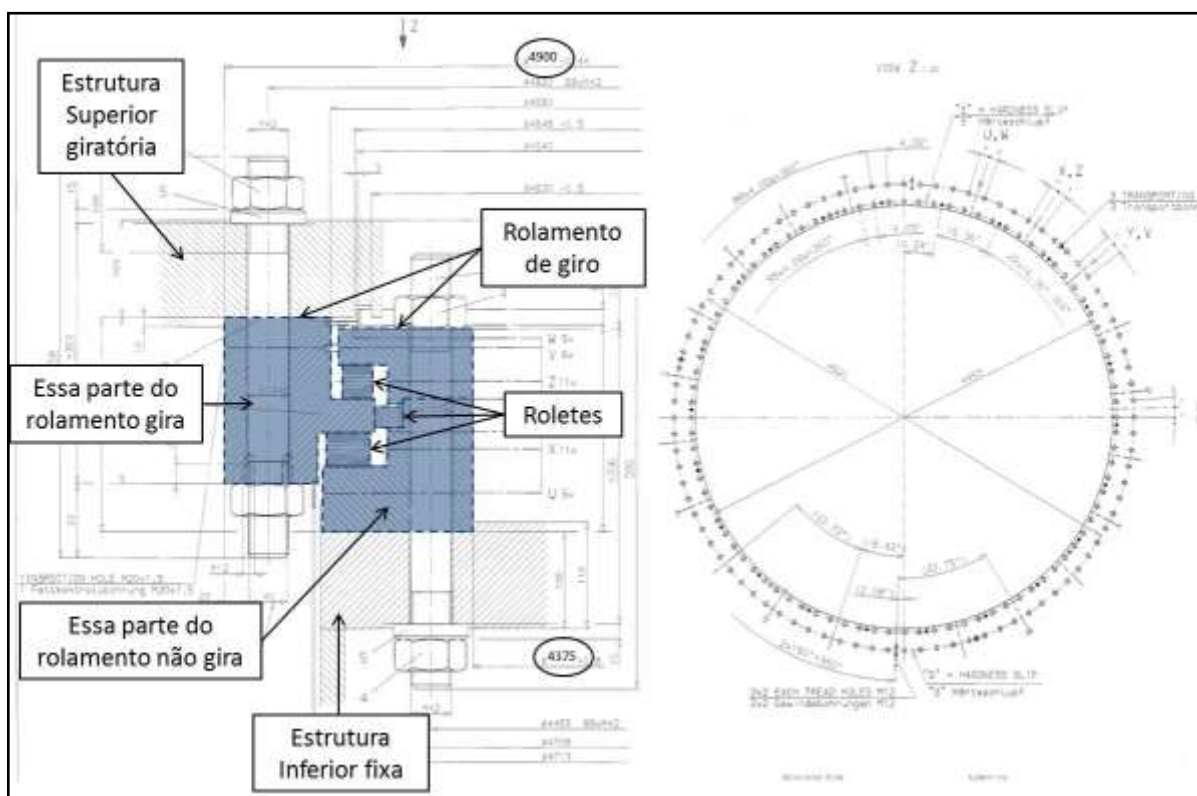
## 2.4 O ROLAMENTO DE GIRO DA TORRE DE PANELA

O Rolamento de Giro da Torre de Panela fica localizado na interface entre a estrutura superior giratória e a estrutura inferior fixa e é ele que permite o movimento de giro relativo entre essas duas estruturas.

### 2.4.1 Projeto

Esse rolamento é do tipo axial de roletes e sua configuração está mostrada em cor mais escura no Desenho 2.3.

Desenho 2.3 – Detalhe do Rolamento de giro da Torre de Panela



Fonte: Centro de Documentação e Informações Técnicas (CDI) da ArcelorMittal Tubarão (2017).

Como pode ser visto, ele é formado por três partes. Duas delas são internas e estão solidárias à estrutura inferior fixa da Torre. A terceira parte é externa e está montada na estrutura superior giratória. Além dessas três partes, este Rolamento ainda possui três carreiras de roletes. Quando o sistema de giro é acionado, o pinhão gira a parte superior da Torre, que está solidária a parte externa do rolamento. Essa, então, irá girar enquanto a parte interna do rolamento permanece parada, fixada na estrutura inferior.

A fixação desse rolamento é feita através de tirantes de alta resistência, com 42 mm de diâmetro, sendo 88 na parte interna (fixa) do rolamento e mais 88 na parte externa (giratória).

Sua lubrificação é realizada através de um sistema automático centralizado que envia graxa periodicamente para 44 pontos de lubrificação ao longo de todo o perímetro do rolamento. Esse sistema é todo monitorado e gera alarmes para o operador caso surja alguma falha durante sua operação.

Quanto às suas dimensões, esse rolamento possui diâmetro externo de 4900 mm, diâmetro interno de 4375 mm e altura de 275 mm. Os roletes da pista inferior possuem 50 mm de diâmetro, os da pista superior 40 mm e os roletes de encosto possuem 25 mm de diâmetro.

#### 2.4.2 Procedimento para troca do Rolamento

Como pode ser observado, em função da posição de montagem deste Rolamento na Torre, a sua troca torna-se uma tarefa bastante complexa. Toda a parte superior da Torre, incluindo principalmente a estrutura giratória, braços, cilindros de elevação e proteções precisa ser retirada para possibilitar a substituição do Rolamento.

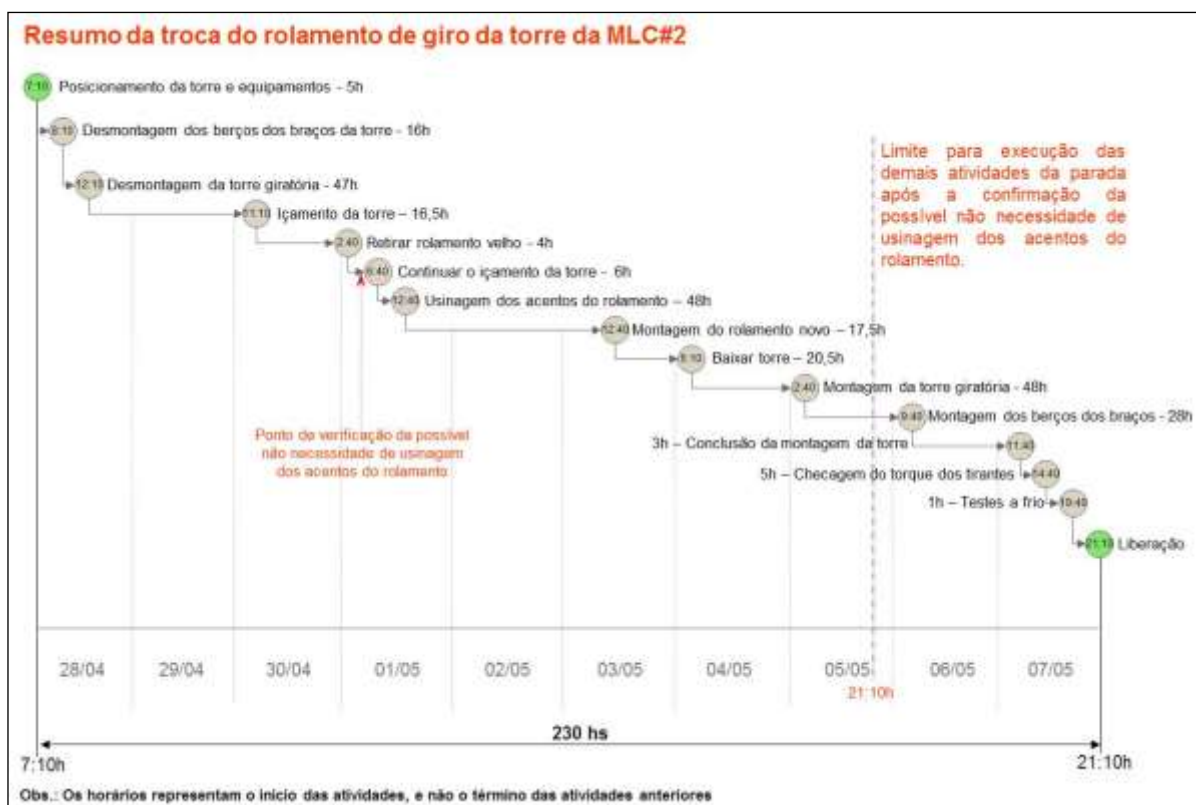
Seguem abaixo as principais atividades para a troca do Rolamento:

- Bloquear e impedir todos os movimentos da Torre;
- Desmontar os 4 berços de apoio da panela;
- Desmontar os corrimãos do topo do chapéu da Torre;
- Desmontar a proteção refratária do acionamento do giro da Torre;
- Montar os dispositivos para troca do Rolamento;

- Desmontar as conexões hidráulicas, elétricas e de utilidades da parte fixa para a parte móvel da Torre;
- Preparar a unidade hidráulica para içamento da Torre;
- Içar a Torre e, à medida que ela for sendo elevada, montar os calços apropriados para a sustentação da estrutura superior;
- Montar o carro de transporte do Rolamento;
- Posicionar o Rolamento velho sobre o carro e retirá-lo da Torre;
- Fazer o levantamento topográfico a *laser* da planicidade das bases de apoio do Rolamento, tanto da inferior quanto da superior;
- Usinar as bases para corrigir a planicidade, caso necessário;
- Posicionar o Rolamento novo sobre o carro e inseri-lo na Torre;
- Montar o Rolamento na base superior da Torre através do tensionamento hidráulico dos tirantes;
- Baixar a Torre com a unidade hidráulica, fazendo a remoção dos calços conforme a Torre for sendo abaixada;
- Fixar o Rolamento na base inferior da Torre através do tensionamento hidráulico dos tirantes;
- Remontar conexões hidráulicas, elétricas e de utilidades;
- Realizar flushing no sistema hidráulico;
- Remontar berços de apoio da panela;
- Remontar corrimãos do chapéu da Torre;
- Remontar proteção refratária do acionamento do giro da Torre;
- Realizar limpeza do local de trabalho;
- Realizar testes e liberar equipamento para a produção.

Na Figura 2.3 pode ser visto o cronograma resumido das atividades, com os prazos para sua execução.

Figura 2.3 – Cronograma para troca do Rolamento da Torre



Fonte: o autor (2017).

Como pode ser visto, a troca é bastante complexa e provoca uma perda de produção de aproximadamente dez dias da unidade. Além disso, o planejamento para a troca precisa ser iniciado aproximadamente oito meses antes da parada para que seja possível a realização de todas as atividades, como a fabricação de estruturas metálicas de apoio, a contratação de diversas empresas para a realização de cada uma das atividades (montagem dos andaimes, topografia a laser, troca do rolamento, limpeza, etc.), além da mobilização de vários setores internos da ArcelorMittal Tubarão, como Engenharia, Oficinas, etc.

O custo de todos os materiais e serviços necessários para a realização da troca, mais o lucro cessante de dez dias de máquina parada totaliza um valor aproximado de R\$ 15,2 milhões. Por esse motivo, o Rolamento da Torre é um componente tão importante para uma unidade de Lingotamento Contínuo e todas as decisões que o envolvem devem ser tomadas da forma mais técnica possível.

## 2.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentadas as características, o funcionamento e os principais componentes da Torre de Panela. Foi mostrada sua forma construtiva, dimensões, capacidade de carga e informações básicas de sua operação. Também foram apresentadas as características do seu componente mais importante, que é o Rolamento de giro. Além de suas características de projeto, também foi mostrado como é feita a sua troca, os principais recursos necessários para essa atividade e a consequente perda de produção.

Todas essas informações nos mostram a importância do Rolamento de giro em uma unidade de Lingotamento Contínuo. Todas as decisões que envolvem esse componente são relevantes e devem ser baseadas em análises técnicas bem embasadas, não apenas em sentimentos.

No próximo capítulo, será apresentado o referencial teórico relativo à Análise de Dados de Vida que será realizada para os rolamentos das Torres das três máquinas de Lingotamento Contínuo da ArcelorMittal Tubarão. Com essa análise, pretende-se obter importantes informações que serão utilizadas na definição da melhor estratégia de manutenção para esse Rolamento e também irão suportar futuras decisões em relação a este componente.

### 3 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

Este capítulo apresenta o referencial teórico aplicável ao trabalho, abordando conceitos de estatística e também de engenharia de confiabilidade. São mostrados os tipos de variáveis e os tipos de dados utilizados em uma análise de dados de vida. Também são mostradas as principais funções matemáticas da engenharia de confiabilidade, explicando de onde elas surgem, por que são importantes e como são utilizadas para realizar cálculos de confiabilidade. Ainda neste capítulo, são apresentadas as distribuições estatísticas mais utilizadas na confiabilidade, em que condições cada uma pode ser aplicada, suas características e a importância dos seus parâmetros e o que eles representam.

A Norma NBR 5462/1994 define dados observados como sendo “valores relativos a um item ou processo obtidos pela observação direta” e complementa “esses valores podem ser eventos, instantes, intervalos de tempo e outros” e “ao registrar os dados, todas as condições e critérios relevantes devem ser indicados”.

Um estudo de Análise de Dados de Vida utiliza os dados de falha de um componente para construir modelos probabilísticos que representem o seu comportamento ao longo do tempo. Este modelo, uma vez construído, será utilizado para realizar previsões futuras de falha deste componente, baseado nas falhas já ocorridas até o momento. Por esse motivo, não é possível conhecer o valor real da confiabilidade de um componente, pois isso só aconteceria quando toda a população deste componente estivesse falhada. Todos os cálculos são baseados em estimativas (Fogliatto e Ribeiro, 2009).

#### 3.1 TIPOS DE VARIÁVEIS

A maioria dos problemas em Engenharia da Confiabilidade é referente à quantificação de medidas, como o tempo até a falha de algum componente ou se ele falhou ou não.

A análise de um componente se ele falhou, resultará em somente duas possibilidades. Para representar esse resultado, uma variável aleatória  $X$  terá dois possíveis valores: defeituoso ou não defeituoso.

Se a análise for referente ao tempo até a falha, a variável X poderá assumir qualquer valor real.

Os dados que serão analisados podem ser variáveis aleatórias discretas ou contínuas, conforme definidas nos itens a seguir.

### 3.1.1 Variável Aleatória Discreta

Se a variável X puder assumir somente valores pré-definidos, então ela é uma variável discreta, ou Variável Aleatória Discreta. Por exemplo, no lançamento de um dado, pode-se obter os valores: 1, 2, 3, 4, 5 ou 6.

### 3.1.2 Variável Aleatória Contínua

Se a variável X puder assumir qualquer valor real, então ela é uma variável contínua, ou Variável Aleatória Contínua. Por exemplo, um motor pode falhar com qualquer quilometragem (se a observação for referente a distância percorrida) ou a qualquer momento (se a observação for referente a tempo desde a última falha). A grande maioria das variáveis nas Análises de Dados de Vida é contínua, pois demonstram o tempo até a falha de um determinado componente, que é uma variável contínua.

## 3.2 TIPOS DE DADOS

Os dados obtidos durante as análises podem conter informações completas ou não. Todos esses dados são importantes e devem ser considerados na análise.

### 3.2.1 Dados Completos

Os dados da amostra serão completos se todos eles representarem o tempo até a falha do componente. Ou seja, durante o período observado, todos os itens falharam.

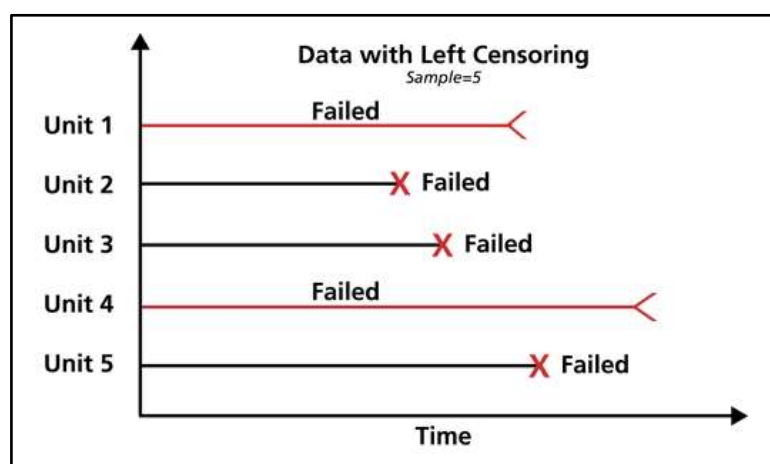
### 3.2.2 Dados Censurados

Os dados são chamados de censurados quando não temos a informação completa sobre eles e são classificados conforme abaixo:

#### 3.2.2.1 Dados Censurados a Esquerda

Quando é conhecido o momento em que a falha ocorreu, mas não se tem a informação de quando o componente iniciou sua operação, esse dado é chamado de censurado a esquerda. A figura 3.1 ilustra essa situação.

Figura 3.1 – Dados censurados a esquerda



Fonte: ReliaSoft Corporation. Life Data Analysis Reference Book. USA, 2015.

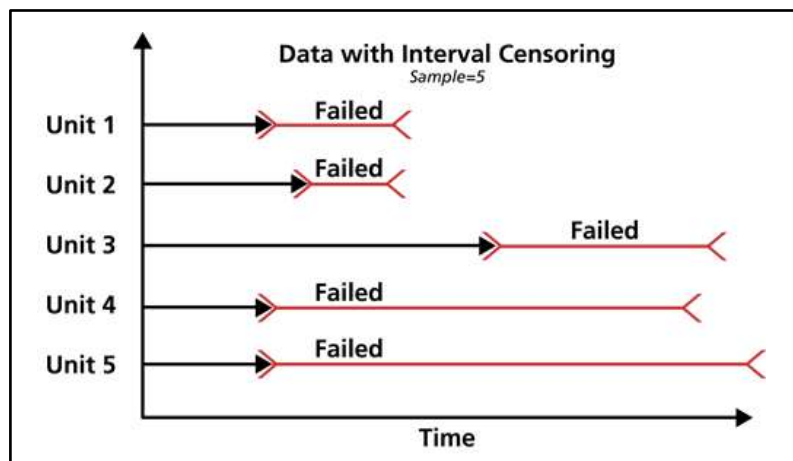
Esse tipo de dado é mais comum em componentes que já estão operando há muito tempo, pois no passado as empresas não tinham muita preocupação com o registro dos eventos que ocorriam em cada componente.



### 3.2.2.2 Dados Censurados em Intervalos

Quando é realizada uma inspeção a cada intervalo de tempo determinado e o componente falha entre uma inspeção e outra, esse dado é chamado de censurado em intervalos. A figura 3.2 ilustra essa situação.

Figura 3.2 – Dados censurados em intervalos



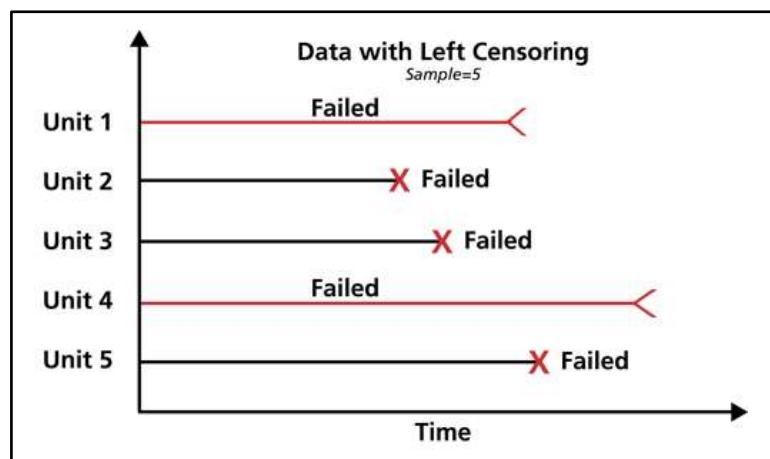
Fonte: ReliaSoft Corporation. Life Data Analysis Reference Book. USA, 2015.

Essa ocorrência é mais comum em componentes que não impactam diretamente no processo, pois se impactassem, o momento da falha seria conhecido.

### 3.2.2.3 Dados Censurados a Direita (Suspensos)

Quando ao final do tempo observado, o item não apresenta falha, este dado é chamado de censurado a direita ou suspenso. Ou seja, o momento de início de operação é conhecido, mas o momento da falha não é. Nesses casos, fica claro que a vida do componente é maior do que o tempo de observação, mas não se sabe a vida real dele, uma vez que não houve a falha. A figura 3.3 ilustra essa situação.

Figura 3.3 – Dados censurados a direita



Fonte: ReliaSoft Corporation. Life Data Analysis Reference Book. USA, 2015.

Suspensões demandam tratamento estatístico diferenciado e não podem ser desconsideradas.

### 3.3 PRINCIPAIS FUNÇÕES APLICADAS À CONFIABILIDADE

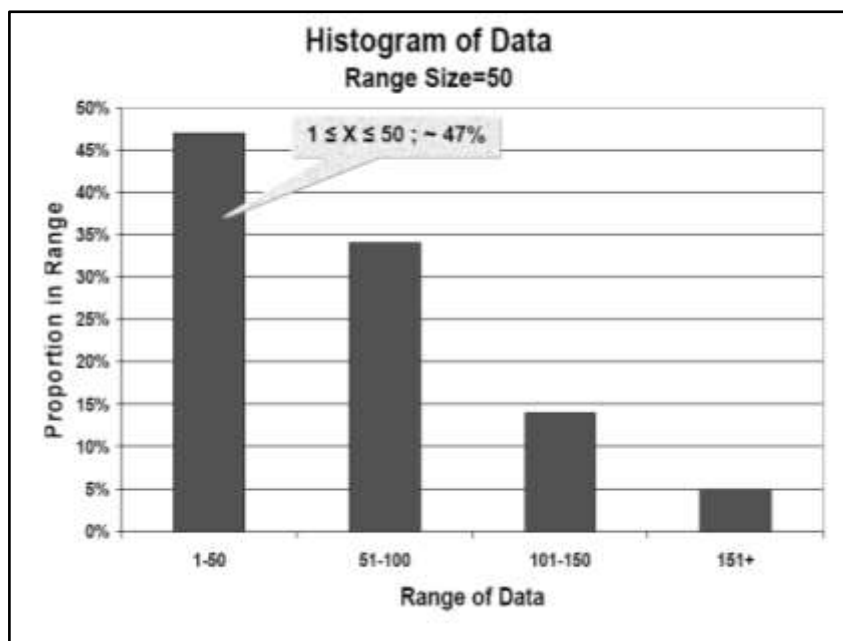
Várias são as funções utilizadas para análise dos dados de vida de um componente. A principal é a Função Densidade de Probabilidade (PDF), que é gerada a partir dos dados coletados e é utilizada para se definir as demais funções.

A seguir, serão apresentadas as principais funções relativas à engenharia de confiabilidade.

#### 3.3.1 A Função Densidade de Probabilidade (PDF) – $f(x)$

A Função Densidade de Probabilidade (PDF) pode ser obtida através de um histograma que represente no eixo horizontal alguns intervalos da variável independente e no eixo vertical o percentual dos dados que se encontram em cada um desses intervalos. A figura 3.4 representa um exemplo de histograma.

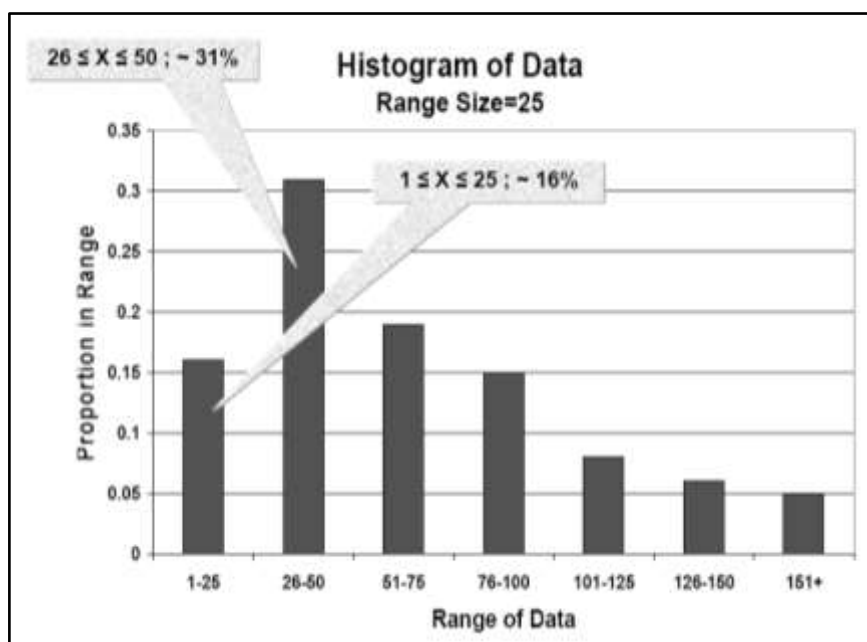
Figura 3.4 – Exemplo de histograma com intervalos a cada 50 unidades de tempo



Fonte: ReliaSoft Education. RS 401 - Análise de Dados de Vida.

Se esse intervalo for reduzido para os mesmos dados, a representação do gráfico fica mais suave e precisa, como pode ser visto na figura 3.5.

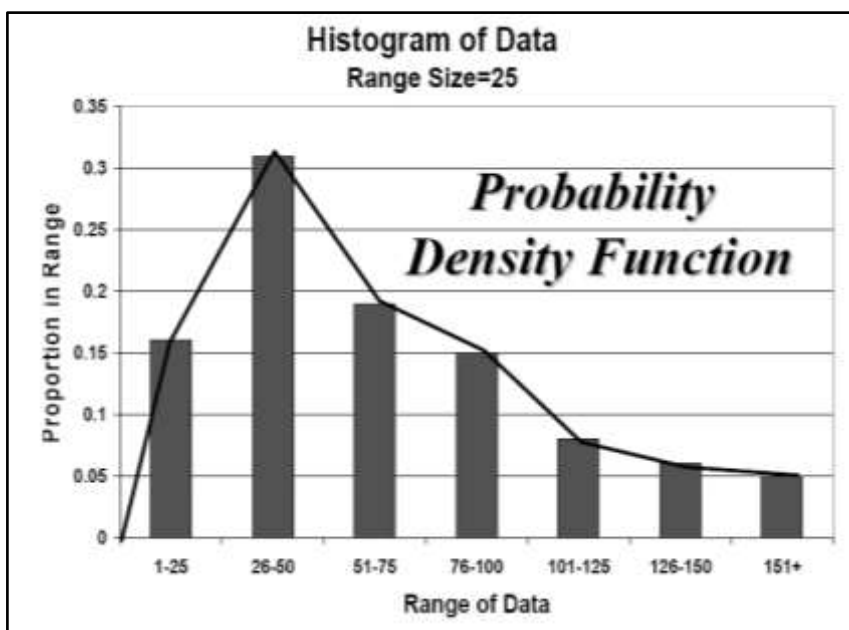
Figura 3.5 – Histograma com intervalos reduzidos para 25 unidades de tempo



Fonte: ReliaSoft Education. RS 401 - Análise de Dados de Vida.

A Função Densidade de Probabilidade desses dados é representada pela curva que une os valores da função em cada intervalo do histograma. Essa PDF está mostrada na Figura 3.6.

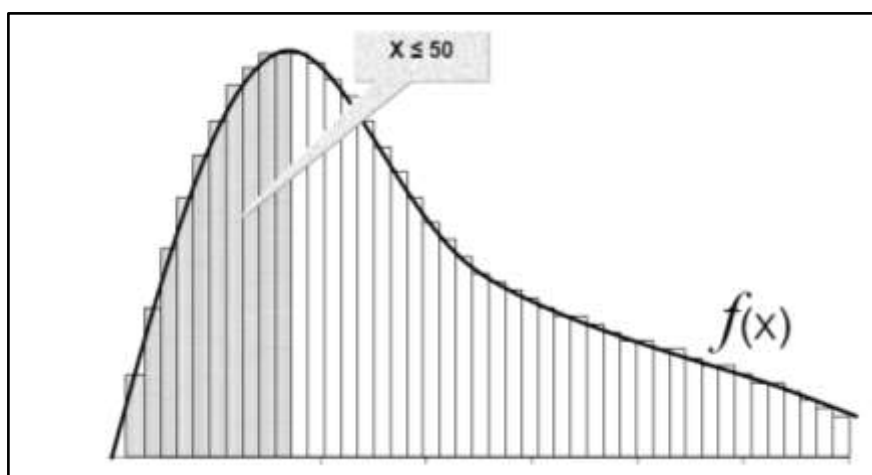
Figura 3.6 – Função Densidade de Probabilidade



Fonte: ReliaSoft Education. RS 401 - Análise de Dados de Vida.

Fazendo esses intervalos tenderem a zero, a curva encontrada estará mais próxima possível da PDF dos dados em estudo, conforme mostrado na Figura 3.7.

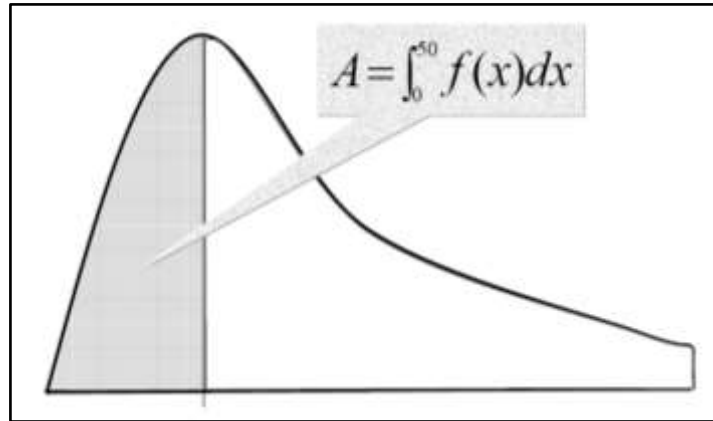
Figura 3.7 – Função Densidade de Probabilidade com intervalos tendendo a zero



Fonte: ReliaSoft Education. RS 401 - Análise de Dados de Vida.

Integrando-se a PDF, é possível obter a área compreendida por ela graficamente. Ver representação na Figura 3.8.

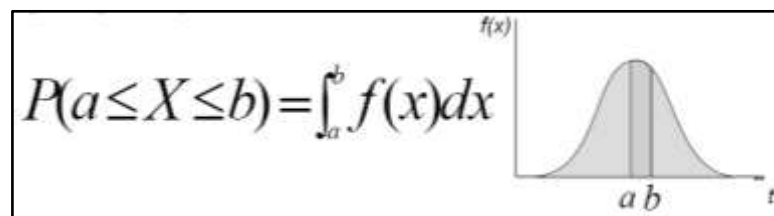
Figura 3.8 – Área sob a curva é igual a integral da PDF



Fonte: ReliaSoft Education. RS 401 - Análise de Dados de Vida.

A definição matemática para a PDF é a seguinte: sendo  $X$  é uma Variável Aleatória Contínua, então a Função Densidade de Probabilidade é a função  $f(X)$  para o intervalo  $[a, b]$  tal que  $a < b$ . Essa definição está ilustrada na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Definição matemática da PDF

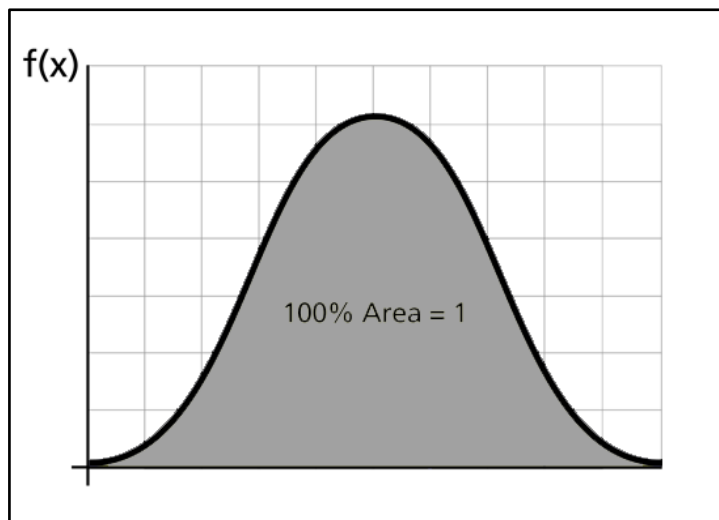


Fonte: ReliaSoft Education. RS 401 - Análise de Dados de Vida.

Ou seja, a probabilidade de  $X$  assumir um valor entre “ $a$ ” e “ $b$ ” é a área compreendida pela PDF entre os valores “ $a$ ” e “ $b$ ”. De forma análoga, a probabilidade de  $X$  assumir um valor menor que “ $a$ ” é a área da PDF entre zero e “ $a$ ”.

E, para que isso seja verdadeiro, a área total sob uma PDF tem que ser igual a 1 (100%), conforme representado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Área sob a PDF



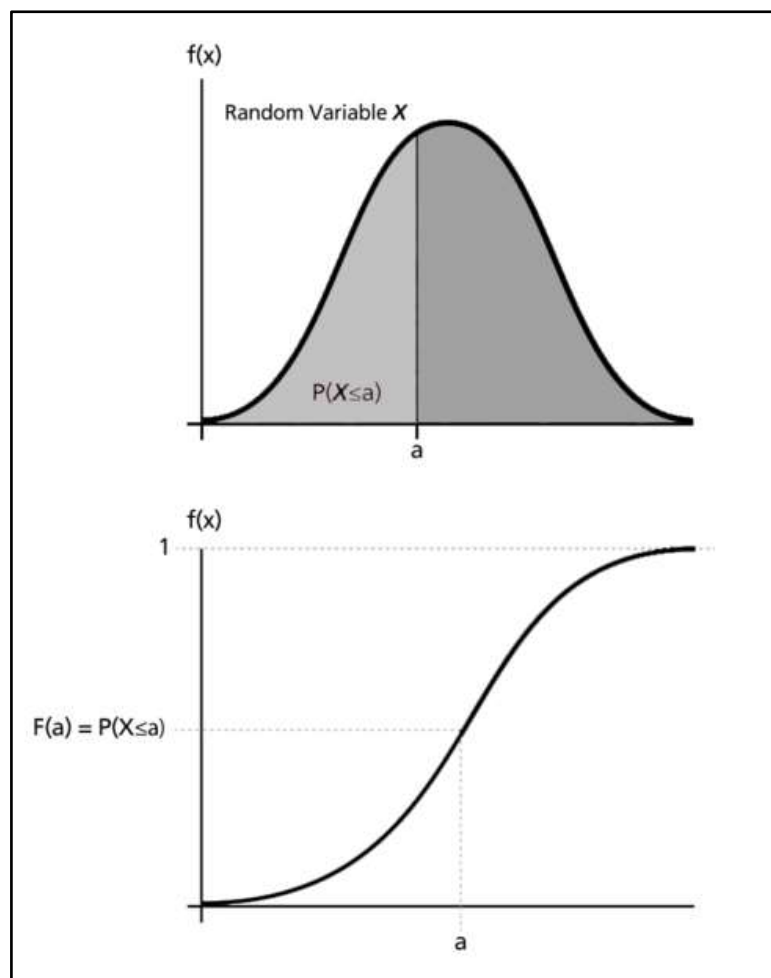
Fonte: ReliaSoft Corporation. Life Data Analysis Reference Book. USA, 2015.

Para concluir, a PDF não trabalha com valores pontuais, e sim com intervalos infinitesimais. Ela informa a probabilidade de uma variável  $X$  assumir um valor em um determinado intervalo estipulado.

### 3.3.2A Função Distribuição Acumulada (CDF) – $F(x)$

A área abaixo da PDF representa a densidade acumulada da variável aleatória contínua. A Função Distribuição Acumulada (CDF) fornece este valor diretamente. Simplificando, a CDF,  $F(X)$ , representa a área formada pela PDF até o valor  $X$  definido. Essa afirmação está representada na figura 3.11.

Figura 3.11 – Representação da CDF



Fonte: ReliaSoft Corporation. Life Data Analysis Reference Book. USA, 2015.

A relação matemática entre a CDF e a PDF é mostrada nas equações (1) e (2):

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

Invertendo:

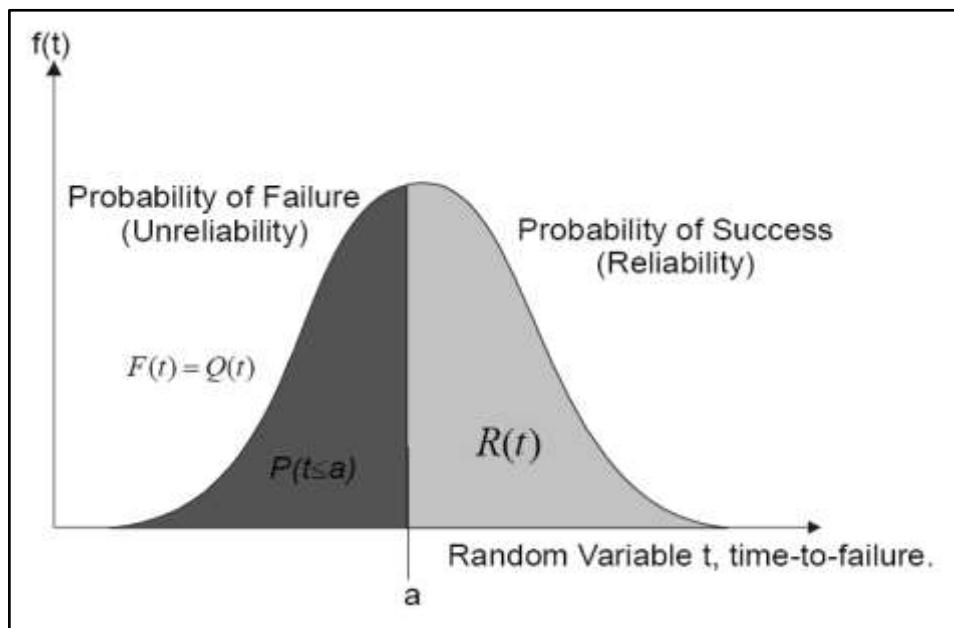
$$f(x) = \frac{d(F(x))}{dx} \quad (2)$$

### 3.3.3A Função Confiabilidade – R(t)

Conforme já mencionado, o cálculo da confiabilidade representa a probabilidade de um item poder desempenhar uma função requerida, sob dadas condições, durante um dado intervalo de tempo.

Se uma PDF representar os dados de falha de um componente, então a área desta função até um determinado tempo “t” irá representar a probabilidade de falha até esse instante. A Função Confiabilidade será então obtida pela área complementar desta PDF, ou seja, a confiabilidade é a probabilidade de não haver falha até um determinado tempo “t”. A Figura 3.12 representa essa afirmação.

Figura 3.12 – Relação entre a probabilidade de falha (não confiabilidade) e a probabilidade de sucesso (confiabilidade)



Fonte: ReliaSoft Education. RS 401 - Análise de Dados de Vida.

Definindo a “Não Confiabilidade” como  $Q(t)$ , então a relação matemática entre elas fica definida conforme a equação (3):

$$F(t) = Q(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (3)$$

Então:

$$Q(t) + R(t) = 1 \quad (4)$$

$$R(t) = 1 - Q(t) \quad (5)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(s)ds \quad (6)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(s)ds \quad (7)$$

Invertendo:

$$f(t) = -\frac{d(R(t))}{dt} \quad (8)$$



Agora que a função Confiabilidade já foi mostrada matematicamente, é possível observar que não é possível falar em Confiabilidade sem associá-la ao tempo. Ou seja, não é possível dizer que um componente possui uma Confiabilidade de 80% sem informar para qual período ela se refere (Fogliatto e Ribeiro, 2009).

Segundo a NBR 5462/1994, a medida de Confiabilidade “é a Probabilidade de um item poder desempenhar uma função requerida, sob dadas condições, durante um dado intervalo de tempo (t1, t2)”.

Knezevic (1993, p. 16) ressalta ainda que a Confiabilidade de um componente é altamente dependente das decisões tomadas na fase do seu projeto, como o tipo de material aplicado, sua geometria, tolerâncias, acabamentos, etc.

#### 3.3.4 A Função Taxa de Falha – $\lambda(t)$

A função Taxa de Falha representa o número de falhas que está ocorrendo em um determinado instante de tempo. Matematicamente, é calculada conforme a equação (9):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (9)$$

Ela é expressa em falhas por unidade de tempo.

#### 3.3.5 A Função Vida Média – MTTF (Mean Time To Failure)

Esse valor é o tempo esperado até a falha. É também chamado de Mean Time Between Failure (MTBF), mas só pode ser chamado assim se o componente for reparável e se a sua taxa de falha for constante. É calculado conforme equação (10).

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t * f(t) dt \quad (10)$$

### 3.4 PRINCIPAIS DISTRIBUIÇÕES APLICADAS À CONFIABILIDADE

Diferentes distribuições podem ser aplicadas a confiabilidade, como por exemplo, Weibull, Exponencial, Normal, Log-normal, Gama, Gama Generalizada, etc., cada uma delas com uma PDF característica.

Para um determinado conjunto de dados de falha, um desses modelos probabilísticos irá melhor representar o comportamento desta população e poderá ser aplicado para realizar previsões futuras. Esses modelos possuem parâmetros, que dependem dos valores dos dados e, conhecendo-se esses parâmetros, é possível saber como será o perfil aproximado da distribuição.

A partir da determinação de qual modelo melhor representa os dados, é possível prever o comportamento de falhas do componente utilizando as funções já descritas no item 3.3. Além delas, alguns outros cálculos podem ser realizados, como a Vida Bx (tempo em que a não confiabilidade ou probabilidade de falha é igual à X%), Vida Mediana, Confiabilidade Condicional, etc.

Nos próximos itens, serão descritas as principais características das distribuições Weibull, Exponencial e Log-normal, que são as mais utilizadas para análise de dados de vida.

#### 3.4.1 A Distribuição Weibull

A distribuição Weibull é uma das mais utilizadas na Engenharia da Confiabilidade em todo o mundo e pode modelar uma grande variedade de dados e características de vida. Isso se deve ao fato da sua taxa de falha poder assumir diferentes formatos (crescente, decrescente ou constante), dependendo do valor do seu parâmetro de forma beta. Além disso, ela é capaz de realizar um estudo de confiabilidade a partir da coleta de apenas três amostras (Fogliatto e Ribeiro, 2009).

A PDF da distribuição Weibull de três parâmetros (Weibull-3P) está representada na equação (11):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (11)$$

Onde:

- $t$  = variável aleatória que representa o tempo
- $\beta$  = parâmetro de forma (ou inclinação)
- $\eta$  = parâmetro de escala (ou vida característica)
- $\gamma$  = parâmetro de localização (ou vida mínima)

O parâmetro de forma beta representa a inclinação da distribuição Weibull e dá a aparência da distribuição. Ou seja, ao variar seu valor, a distribuição de Weibull pode representar uma curva típica de falhas prematuras, aleatórias ou de falhas por desgastes. Beta é adimensional e seu valor normalmente varia entre 0,2 e 10.

Dependendo do valor de beta, a distribuição Weibull se assemelha a outras distribuições, conforme abaixo:

- Se  $\beta < 1$ : Distribuição Hiper-exponencial
- Se  $\beta = 1$ : Distribuição Exponencial
- Se  $3 < \beta < 4$ : Distribuição Normal
- Se  $\beta = 3,44$ : Distribuição Normal Simétrica
- Se  $\beta = 2$ : Distribuição Rayleigh ou Lognormal

A letra grega éta ( $\eta$ ) representa o parâmetro de escala da distribuição Weibull e também a vida característica dos dados em análise. Possui a mesma unidade do tempo “t”. A vida característica é o período em que acontecem cerca de 63,2% das falhas e a confiabilidade fica reduzida a  $R(x) = e^{-1} = 0,368$ . Isso significa que existe 36,8% de itens que não apresentaram falha até o tempo éta.

A letra grega gama ( $\gamma$ ) é chamada de parâmetro de localização e possui a mesma unidade do tempo “t”. Gama representa um deslocamento da função no eixo X. Se gama for igual a zero, a distribuição irá se iniciar exatamente sobre o valor zero do eixo X. Um valor positivo de gama indica que as falhas só ocorrem a partir desse tempo, ou seja, para um tempo menor do que gama, a confiabilidade é de 100%. Um valor negativo do parâmetro gama significa que o componente possui uma confiabilidade menor do que 100% quando o tempo for igual a zero. Isso significa que existe algum modo de falha que ocorre antes do componente começar a operar. Este modo de falha pode estar relacionado a degradação do item enquanto estiver no estoque.

Gama sendo igual a zero, a PDF assume sua forma mais popular, com apenas dois parâmetros (Weibull-2P), sendo representada conforma equação (12):

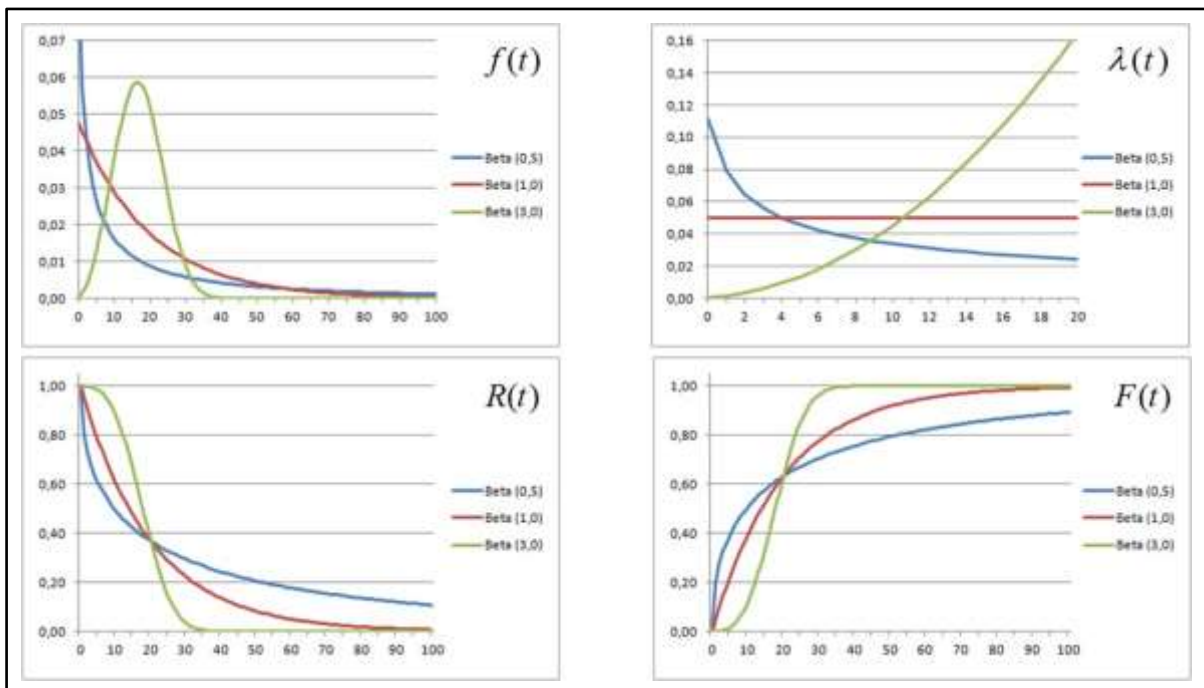
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (12)$$

Considerando a PDF tri-paramétrica e as definições já vistas para as demais funções, tem-se para a distribuição Weibull-3P:

- Função Distribuição Acumulada CDF:  $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$
- Função Confiabilidade:  $R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$
- Função Taxa de Falha:  $\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$
- Função Vida Média:  $MTTF = \gamma + \eta * \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$

Na Figura 3.13, pode-se observar a influência do parâmetro de forma  $\beta$  nas funções de confiabilidade da distribuição Weibull. Nos gráficos dessa figura,  $\beta$  assume os valores de 0,5, 1 e 3. Foi considerado  $\gamma = 0$  (ou seja, Weibull-2P).

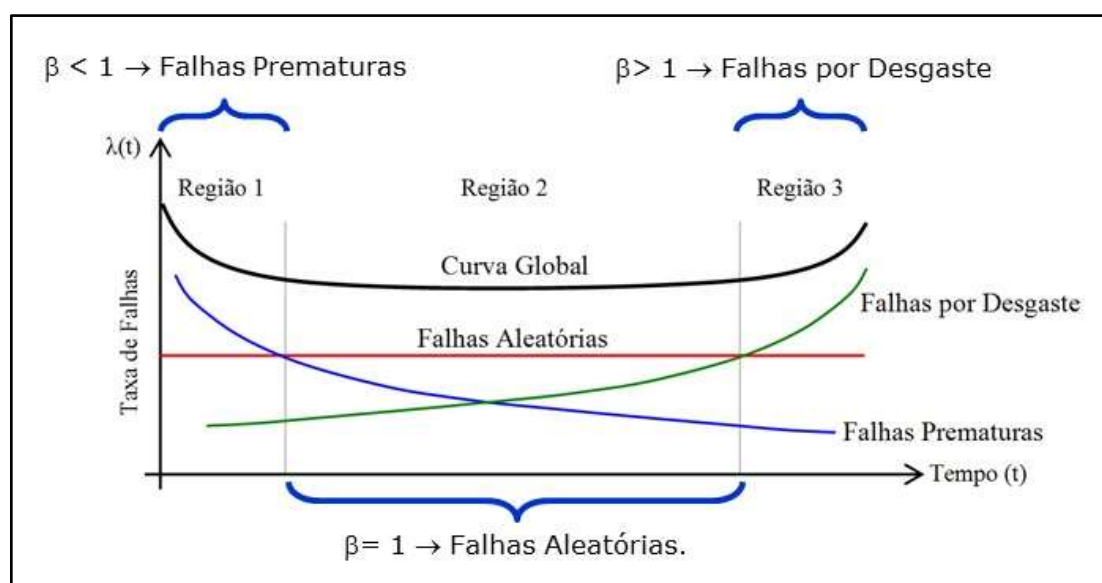
Figura 3.13 – Influência de  $\beta$  nas funções de confiabilidade de Weibull-2P



Fonte: Rigoni, Emerson; Mariano, Carlos H. Aspectos Operacionais – Distribuições aplicadas à Confiabilidade – Determinação do ajuste.

Levando essa característica da taxa de falha para a curva da banheira, uma importante observação pode ser feita a respeito. Pode-se observar que se  $\beta$  for menor do que 1, a taxa de falha é decrescente, o que significa que as falhas estão ocorrendo na região inicial da curva da banheira. Com isso, pode-se concluir que, nesse caso, o componente está tendo mortalidade infantil (falhas prematuras). Esse tipo de falha ocorre normalmente por problemas de projeto, fabricação ou montagem. Por sua vez, se  $\beta$  for igual a 1, a taxa de falha é constante e o componente está falhando de forma aleatória no período de vida normal dele. E, por fim, se  $\beta$  for maior do que 1, a taxa de falha é crescente e o componente está falhando por desgaste. Neste último caso, uma manutenção baseada no tempo pode ser uma boa estratégia. A representação desta análise pode ser vista na Figura 3.14 (Flogliatto e Ribeiro, 2009).

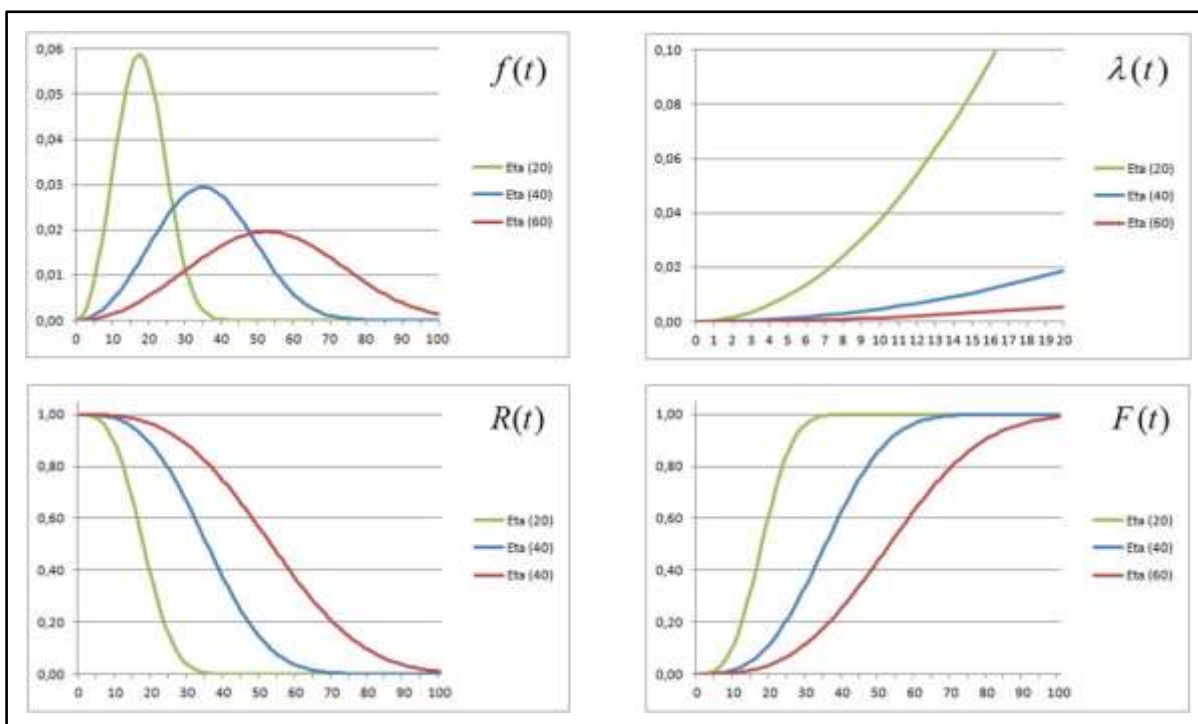
Figura 3.14 – Relação entre  $\beta$  e a curva da banheira



Fonte: Rigoni, Emerson; Mariano, Carlos H. Aspectos Operacionais – Distribuições aplicadas à Confiabilidade – Determinação do ajuste.

Em relação ao parâmetro de escala  $\eta$ , a sua influência na confiabilidade pode ser vista na Figura 3.15, onde ele assume os valores de 20, 40 e 60.

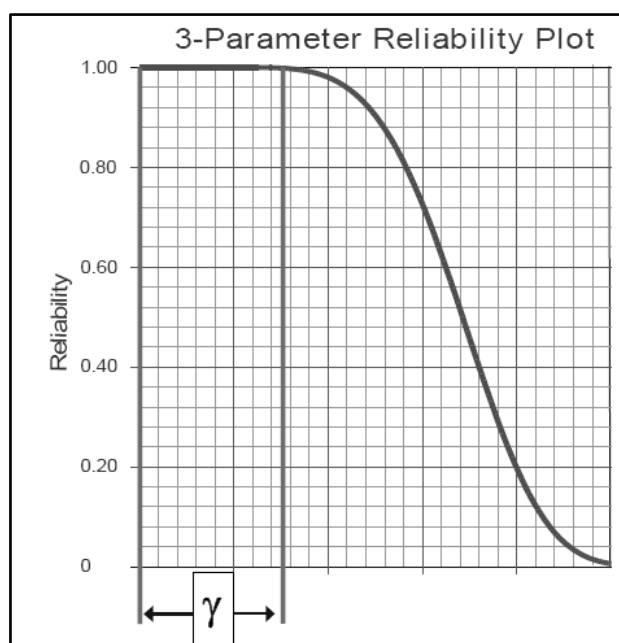
Figura 3.15 – Influência de  $\eta$  na função confiabilidade



Fonte: Rigoni, Emerson; Mariano, Carlos H. Aspectos Operacionais – Distribuições aplicadas à Confiabilidade – Determinação do ajuste.

Em relação ao parâmetro de localização  $\gamma$ , a sua influência na confiabilidade pode ser vista na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Influência de  $\gamma$  na função confiabilidade



Fonte: ReliaSoft Education. RS 401 - Análise de Dados de Vida: Distribuição Weibull.

Pode-se observar que para um tempo menor do que gama, a confiabilidade é igual a 100%.

### 3.4.2A Distribuição Exponencial

Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 31) destacam que essa distribuição é muito utilizada na engenharia de confiabilidade por ser matematicamente simples, sendo por vezes, utilizada inadequadamente. É um caso particular da distribuição Weibull onde  $\beta$  é igual a 1 e é utilizada para representar um comportamento de falhas aleatórias, tendo na sua forma mais comum apenas 01 parâmetro ( $\lambda$  - lambda). A PDF da distribuição exponencial é definida conforme equação (13):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (13)$$

Onde:

- $t$  = variável aleatória que representa o tempo
- $\lambda$  = parâmetro da distribuição e representa a taxa de falha constante, em número de falhas por unidade de tempo.

Com essa PDF, considerando as definições já vistas para as demais funções, tem-se para a distribuição exponencial:

- Função Distribuição Acumulada CDF:  $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
- Função Confiabilidade:  $R(t) = e^{-\lambda t}$
- Função Taxa de Falha:  $\lambda(t) = \lambda$
- Função Vida Média:  $MTTF = \frac{1}{\lambda}$

Pode-se observar que a função Taxa de Falha,  $\lambda(t)$ , na distribuição exponencial é constante, não dependendo do tempo.

Há ainda a distribuição exponencial bi paramétrica, onde o segundo parâmetro é representado pela letra gama, que é o parâmetro da localização. Essa distribuição é pouco utilizada na prática.

### 3.4.3A Distribuição Log-normal

É normalmente utilizada para análises de componentes submetidos a fadiga ou cargas variáveis. Quando o logaritmo natural dos tempos até a falha são normalmente distribuído, é dito que os dados seguem uma distribuição Log-normal.

A PDF da Distribuição Log-normal está representada na equação (14):

$$f(T') = \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T' - \mu'}{\sigma'} \right)^2} \quad (14)$$

Onde:

- $T' = \ln(T)$  e  $T$  são tempos até a falha
- $\mu'$  = média do logaritmo natural dos tempos até a falha
- $\sigma'$  = desvio padrão do logaritmo natural dos tempos até a falha

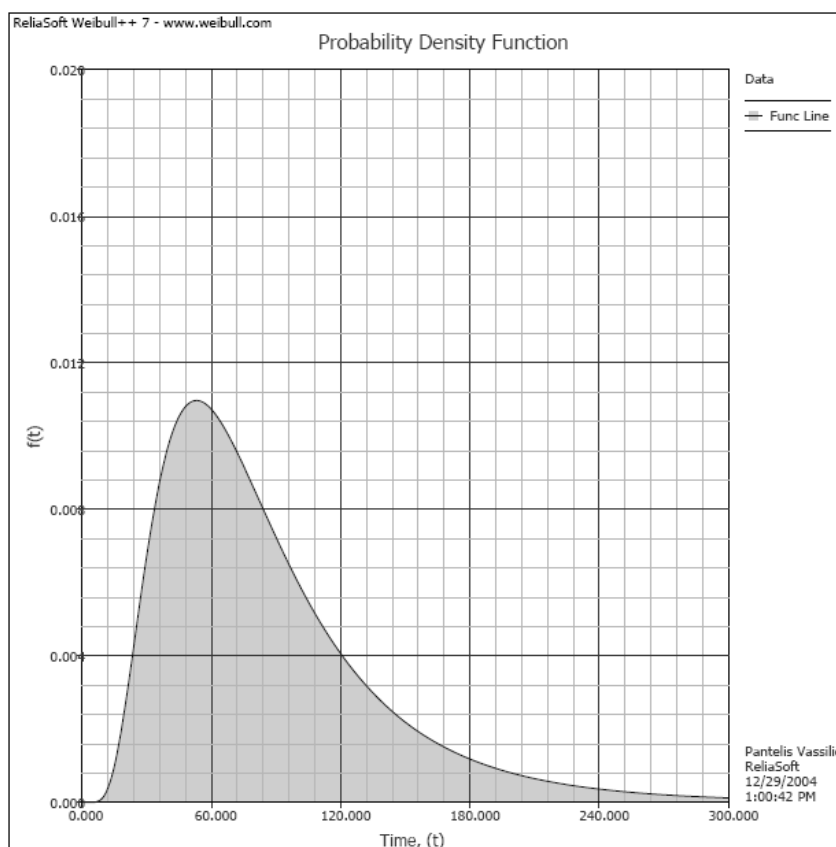
Com essa PDF, considerando as definições já vistas para as demais funções, tem-se para a distribuição Log-normal:

- Função Confiabilidade: 
$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dt$$
- Função Taxa de Falha: 
$$\lambda(t) = \frac{\frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - \mu'}{\sigma'} \right)^2}}{\int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dt}$$
- Função Vida Média: 
$$MTTF = e^{\left( \mu' + \frac{1}{2} \sigma'^2 \right)}$$

Enquanto a distribuição Normal é simétrica em relação ao tempo, a Log-normal é assimétrica e deslocada para a esquerda, como pode ser visto na figura 3.17.



Figura 3.17 – Curva da distribuição Log-normal



Fonte: ReliaSoft Education. RS 401 - Análise de Dados de Vida: Distribuição Log-normal.

Essa distribuição permite uma melhor aderência para comportamentos assimétricos de dados de vida.

### 3.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi apresentada a teoria que sustenta a Análise de Dados de Vida.

Primeiramente, foi mostrada a definição de variáveis discretas e contínuas e foi visto que a grande maioria das variáveis consideradas nas Análises de Dados de Vida são contínuas, pois tratam-se de registros de tempo de funcionamento de um componente até a sua falha.

Em seguida, foram apresentados os conceitos de dados completos e dados censurados, reforçando que todos eles devem ser considerados na análise. Nenhum deles pode ser desprezado.

Depois foram mostradas as principais funções relacionadas a confiabilidade, explicando seus conceitos e a forma de cálculo.

Por último, foram apresentadas algumas distribuições mais comuns, com um foco especial na Weibull, que é a mais utilizada para Análise de Dados de Vida por ser a mais flexível.

No próximo capítulo, será feita a Análise de Dados de Vida do Rolamento da Torre de Panela baseada nessa teoria apresentada neste capítulo.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do trabalho, abordando como os dados foram coletados e o nível de confiança dessa coleta. Em seguida, explica como eles foram tratados estatisticamente e os resultados obtidos. Uma análise detalhada desses resultados é feita, abordando o modelo probabilístico escolhido e os valores encontrados para os seus parâmetros e também os resultados de confiabilidade simulados.

Para a realização das análise dos dados, primeiramente foi realizada a sua coleta, depois os dados foram tratados com a utilização de um software específico e então, os resultados foram analisados. Esses passos estão descritos a seguir.

### 4.1 COLETA DOS DADOS

A etapa de coleta dos dados foi relativamente simples porque o número de falhas é pequeno e elas foram registradas de forma bem detalhada no histórico de manutenção, sendo 100% confiáveis.

Foram coletados os dados de todas as falhas ocorridas nos Rolamentos de Giro das Torres das três Máquinas de Lingotamento Contínuo da ArcelorMittal Tubarão desde 1995, quando iniciou-se a operação da primeira Máquina.

Concluído o levantamento, foram obtidos os seguintes dados de cada Máquina:

- Máquina 01:
  - Início de operação: abril/1995;
  - Primeira troca por falha: outubro/2003;
  - Rolamento operando até o momento (setembro/2017), portanto dado em suspensão.
- Máquina 02:
  - Início de operação: fevereiro/1998;
  - Primeira troca por falha: abril/2008;
  - Segunda troca por falha: janeiro/2016;

- Rolamento operando até o momento (setembro/2017), portanto dado em suspensão.
- Máquina 03:
  - Início de operação: julho/2007;
  - Rolamento operando até o momento (setembro/2017), portanto dado em suspensão.

Portanto, foram analisados os seguintes dados:

- 8,500 anos (falha);
- 13,917 anos (suspensão);
- 10,167 anos (falha);
- 7,750 anos (falha);
- 1,667 (suspensão);
- 10,167 anos (suspensão).

## 4.2 RESULTADOS OBTIDOS DE CONFIABILIDADE

Para a realização da análise dos dados foi utilizado o software Weibull++ versão 11 da ReliaSoft.

Na abertura do software, foi informado que os dados contém suspensão e, portanto, foi criada por ele uma coluna para se identificar se o dado era uma falha ou uma suspensão. Os valores dos dados inseridos no software foram aqueles listados no item 4.1.

Após a entrada desses dados, foi utilizado o recurso “Assistente de Distribuição” do software para que ele avaliasse o modelo estatístico que melhor aderiria aos dados. Segue abaixo o ranking obtido como resultado:

- 1º - Weibull-3P;
- 2º - Gama;
- 3º - Gama-G e Exponencial-2P;
- 4º - Lognormal e Loglogística;
- 5º - Logística;
- 6º - Normal;

7º - Weibull-2P;

8º - Gumbel;

9º - Exponencial-1P;

Conforme já relatado anteriormente, a distribuição Weibull 3P é bastante flexível e, portanto, foi considerada satisfatória para a realização desta análise.

O software optou pelas seguintes configurações de análise:

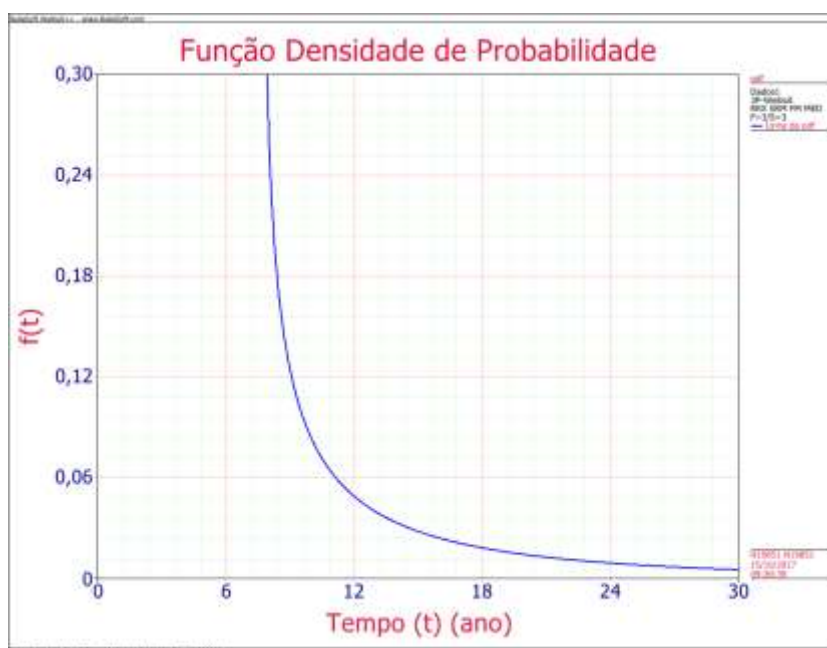
- Método de análise: NLRR (regressão do ranque não linear);
- Método de ranqueamento padrão;
- Método dos limites de confiança: FM (matriz de Fisher);
- Método do ranque: MED (ranques medianos).

O passo seguinte foi realizar o cálculo no software. Os resultados estão listados abaixo:

- Parâmetro beta = 0,591679
- Parâmetro éta = 4,809637 anos
- Parâmetro gama = 7,566250 anos
- Coeficiente de correlação Rho = 0,999988

Além desses resultados, foram obtidos do software vários gráficos relativos aos dados. No Gráfico 4.1 está apresentada a PDF dos dados.

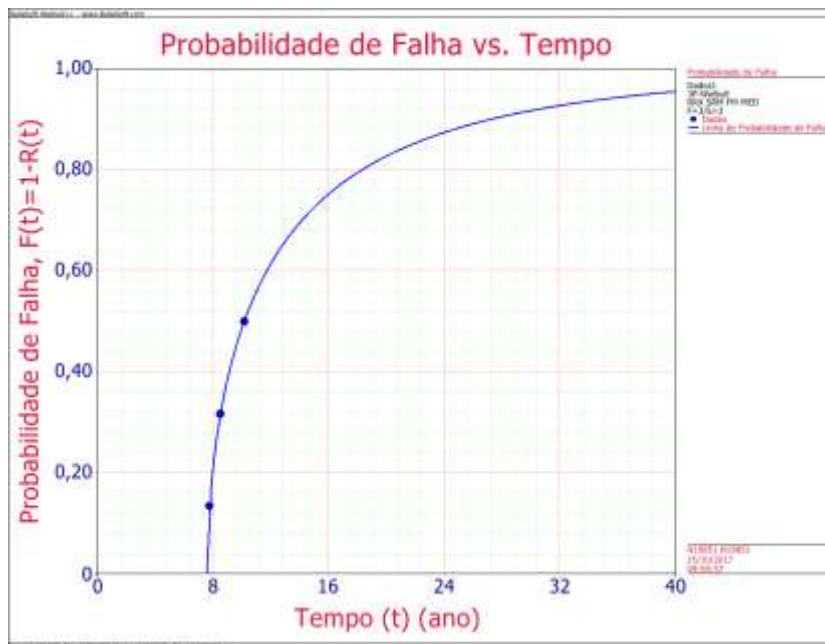
Gráfico 4.1 – Função Densidade de Probabilidade (PDF)



Fonte: o autor (2017) – aplicação do software Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

No Gráfico 4.2 está apresentada a função probabilidade de falha  $F(x)$ .

Gráfico 4.2 – Função Probabilidade de Falha



Fonte: o autor (2017) – aplicação do software Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

No Gráfico 4.3 está apresentada a da função confiabilidade  $R(t)$ .

Gráfico 4.3 – Função Confiabilidade  $R(t)$



Fonte: o autor (2017) – aplicação do software Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

No Gráfico 4.4 está apresentada a variação da taxa de falha ( $\lambda$ ) no tempo.

Gráfico 4.4 – Função Taxa de Falha ( $\lambda$ )



Fonte: o autor (2017) – aplicação do software Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

No Gráfico 4.5 estão apresentados os dados analisados na linha do tempo, identificando se representam falha ou suspensão.

Gráfico 4.5 – Dados analisados na linha do tempo – falha ou suspensão



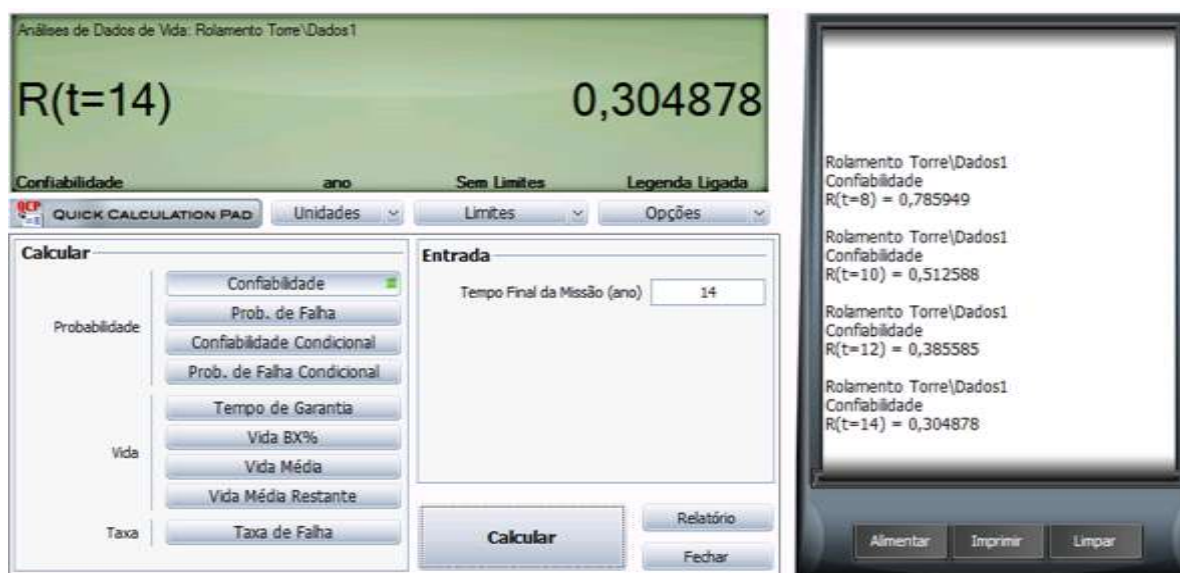
Fonte: o autor (2017) – aplicação do software Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

### 4.3 SIMULAÇÕES

Com o modelo probabilístico dos dados de falha já devidamente identificado e os seus parâmetros calculados, torna-se possível realizar as simulações desejadas.

Para o valor da confiabilidade, já é sabido que abaixo de 7,57 anos (valor de gama) a confiabilidade é igual a 1. Portanto, foram simuladas as confiabilidades para os períodos de 8, 10, 12 e 14 anos, apresentadas no painel direito da Figura 4.1.

Figura 4.1 – Confiabilidade para 8, 10, 12 e 14 anos



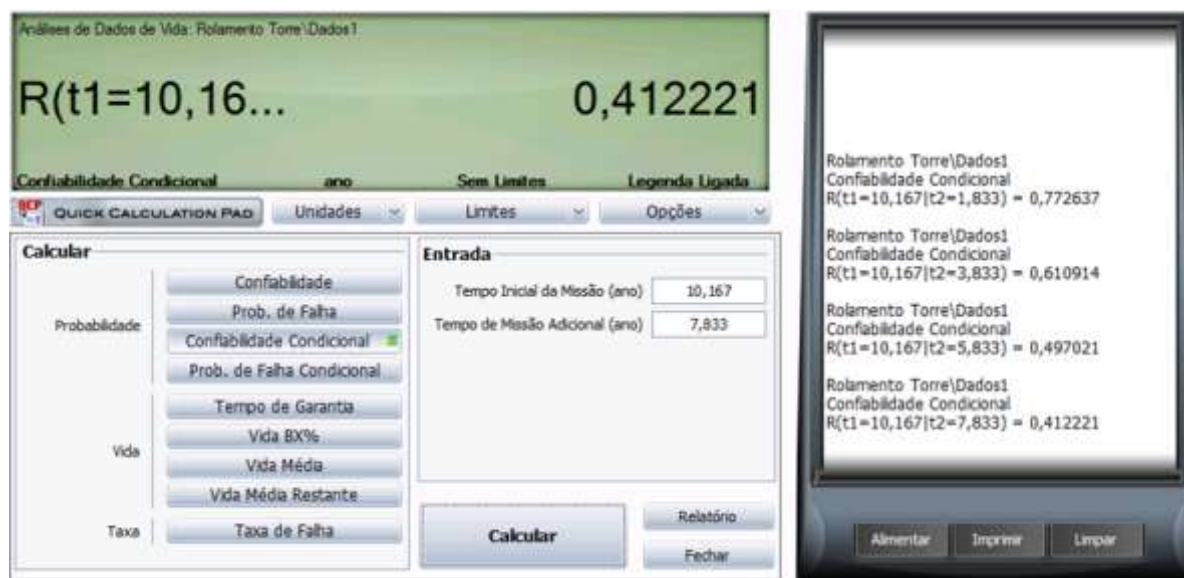
Fonte: o autor (2017) – aplicação do software Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Como a probabilidade de falha é igual a 1 menos a confiabilidade, torna-se desnecessária essa simulação.

Para a confiabilidade condicional, será calculada a probabilidade do Rolamento da Máquina 03 atingir as vidas de 12, 14, 16 e 18 anos, considerando que ele já operou 10,167 anos. Esses resultados podem ser observados no painel direito da figura 4.2.



Figura 4.2 – Confiabilidade condicional para o Rolamento da Máquina 03

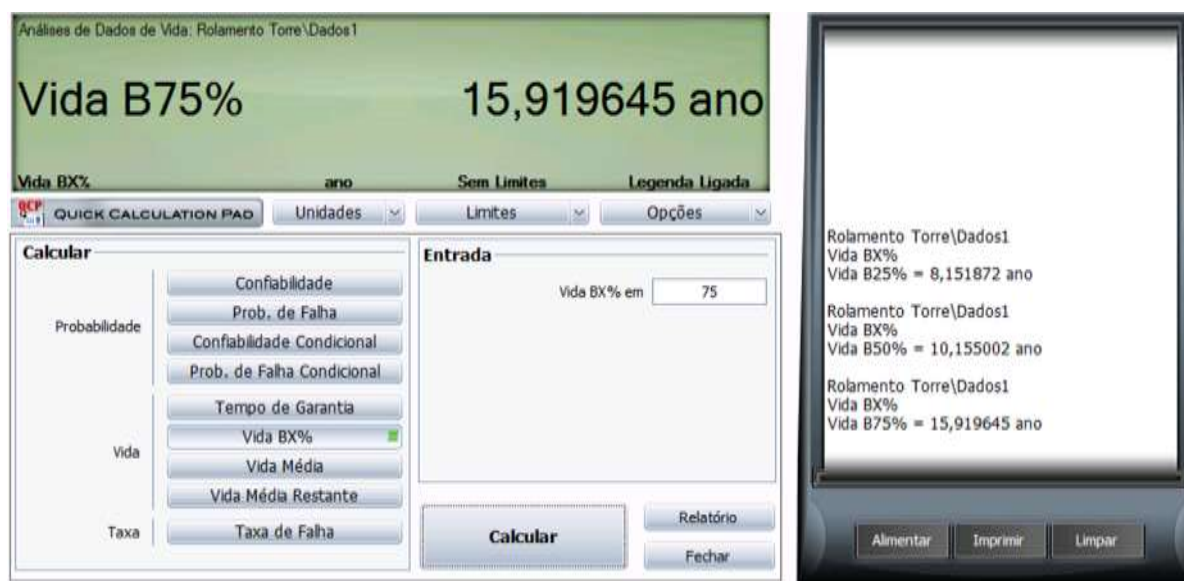


Fonte: o autor (2017) – aplicação do software Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Com essas análises, percebemos que se um Rolamento novo for montado hoje, a probabilidade de ele atingir uma vida de 12 anos é de 38,5%. Por outro lado, o Rolamento da Máquina 03 possui uma probabilidade de 77,2% de atingir essa vida, uma vez que já está operando há mais de mais de 10 anos.

No painel direito da Figura 4.3 podem ser observadas as vidas em que 25%, 50% e 75% dos Rolamentos falham.

Figura 4.3 – Vida BX% para 25%, 50% e 75% dos Rolamentos



Fonte: o autor (2017) – aplicação do software Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

O cálculo da vida média dos Rolamentos está demonstrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Vida média dos Rolamentos



Fonte: o autor (2017) – aplicação do software Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Muitas outras simulações poderiam ter sido feitas a partir da definição do modelo probabilístico. Entretanto, faz-se necessária uma análise desses resultados já encontrados.

#### 4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Seguem abaixo as análises dos valores encontrados.

##### 4.4.1 O Coeficiente de Correlação – $\rho$

O Coeficiente de Correlação sendo igual a 0,999988 (muito próximo de 1) indica que o modelo escolhido possui uma aderência muito boa aos dados analisados.

#### 4.4.2 O Parâmetro de forma – $\beta$

Como o valor de beta foi igual a 0,591679, portanto menor do que 1, os dados indicam que o Rolamento está falhando de forma prematura (mortalidade infantil). O Gráfico 4.5, já mencionado, mostra a situação das seis amostras analisadas e nela é possível perceber intuitivamente que realmente as falhas foram prematuras.

Esse resultado é muito importante para ratificar os resultados das análises que foram realizadas nas ocasiões das falhas dos rolamentos. Em todas as três falhas ocorridas, foram identificados desvios de montagem que teriam contribuído para a redução da vida do Rolamento. Agora, estão matematicamente confirmadas essas suposições.

Uma vez verificada essa condição, atenção especial foi dada ao procedimento de montagem do Rolamento, que é bastante complexo. Para evitar uma nova falha devido a problemas de montagem, um FMEA foi realizado com ênfase nos modos de falha causados por desvios de montagem. Esse item específico do FMEA está mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Detalhe do FMEA da Torre de Giro, relativo a potenciais falhas na montagem do Rolamento

Se NÍVEL - ITEM FUNCIONAL	FUNÇÃO DO ITEM FUNCIONAL	FALHA FUNCIONAL ITEM FUNCIONAL	MODOS DE FALHAS ITEM FUNCIONAL	SEVE R	OCO RR	DETE C	RPN	CAUSAS	AÇÕES PROPOSTAS
ROLAMENTO DE GIRO DA TORRE	PERMITIR O MOVIMENTO RELATIVO ENTRE A PARTE FIXA E A GIRATÓRIA DA TORRE	NÃO PERMITIR O MOVIMENTO RELATIVO ENTRE A PARTE FIXA E A GIRATÓRIA DA TORRE	PISTAS DO ROLAMENTO DESGASTADAS PREMATURAMENTE DEVIDO A CONDIÇÃO DE TRABALHO DIFERENTE DA PREVISTA NO PROJETO	9	2	9	162	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PLANICIDADE DAS BASES DE APOIO DO ROLAMENTO SUPERIOR A 0,3 MM;</li> <li>- CONICIDADE DAS BASES DE APOIO DO ROLAMENTO SUPERIOR A 0,17 MM;</li> <li>- SOFT POINT (HARDNESS GAP) DO ROLAMENTO MONTADO NA REGIÃO DE MAIOR CARGA;</li> <li>- FORÇA DE TRACIONAMENTO DOS TIRANTES DIFERENTE DE 807,14 kN;</li> <li>- PRESENÇA DE CORPO ESTRANHO ENTRE AS BASES DE APOIO E AS PISTAS EXTERNAS DO ROLAMENTO.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ELABORAR PADRÃO PARA A TROCA DO ROLAMENTO, INCLUINDO:</li> <li>- GARANTIR DESVIO MÁXIMO DE PLANICIDADE DAS BASES DE APOIO DO ROLAMENTO IGUAL A 0,3 MM;</li> <li>- GARANTIR DESVIO MÁXIMO DE CONICIDADE DAS BASES DE APOIO DO ROLAMENTO IGUAL A 0,17 MM;</li> <li>- GARANTIR O POSICIONAMENTO CORRETO DO SOFT POINT (HARDNESS GAP) DO ROLAMENTO, MONTANDO-O NA REGIÃO POR ONDE PASSA A PAINELA VAZIA;</li> <li>- GARANTIR QUE A FORÇA DE TRACIONAMENTO DOS TIRANTES SEJA IGUAL A 807,14 kN. UTILIZAR TENSIONADOR HIDRÁULICO;</li> <li>- GARANTIR QUE AS BASES DE APOIO DO ROLAMENTO ESTEJAM PERFEITAMENTE LIMPAS NO MOMENTO DA MONTAGEM.</li> </ul>

Fonte: o autor (2017).

Essas saídas do FMEA foram incluídas no procedimento de montagem do Rolamento, que foi elaborado e depois arquivado no sistema de manutenção da ArcelorMittal Tubarão.

Para concluir a análise do parâmetro beta, uma importante observação torna-se necessária neste momento. Como o Rolamento está falhando com vida prematura devido a desvios na montagem e a confiabilidade é uma característica inerente do projeto do componente, os valores encontrados de confiabilidade para vidas futuras estão “contaminados” por essas falhas e não representam de fato a confiabilidade de projeto deste componente. Portanto, os valores encontrados nas simulações com vidas futuras estão subestimados, visto que os problemas de montagem ocorridos no passado já foram corrigidos e tendem a não se repetirem no futuro. Alguns especialistas defendem que não é coerente a realização de cálculos do valor de confiabilidade para um modelo de Weibull que possua o parâmetro beta menor do que 1.

#### 4.4.3 O Parâmetro de escala (vida característica) – $\eta$

Como já visto anteriormente, este parâmetro representa a vida característica do Rolamento, ou seja, a vida em que 63,2% dos componentes terão talhado. Quando o parâmetro gama for diferente de zero, como neste caso em análise, a vida característica é encontrada através da soma dos valores dos parâmetros éta e gama, que resulta no valor de 12,375887 anos.

#### 4.4.4 O Parâmetro de localização (vida mínima) – $\gamma$

Em relação a este parâmetro, podemos fazer uma análise interessante. O seu valor foi igual a 7,57 anos. Isso significa que, mesmo com os desvios na montagem, a confiabilidade deste componente é de 100% para um tempo de operação menor do que este, baseado no histórico atual.

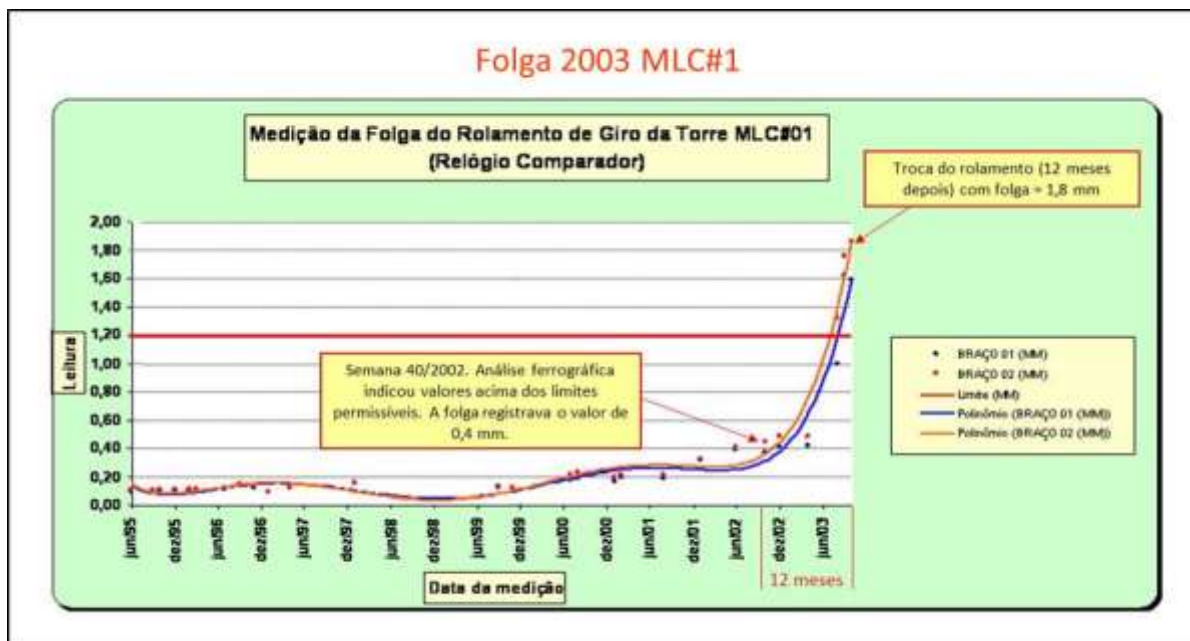
Com essa informação, associado ao fato de que os desvios de montagem ocorridos no passado não se repetiram nos Rolamentos que estão em operação,

pode-se considerar que não é necessário ter um Rolamento sobressalente até que o que esteja em operação atinja esta vida. Essa é uma boa referência para o momento ideal de aquisição de um Rolamento sobressalente para estoque.

#### 4.4.5 Análises Complementares

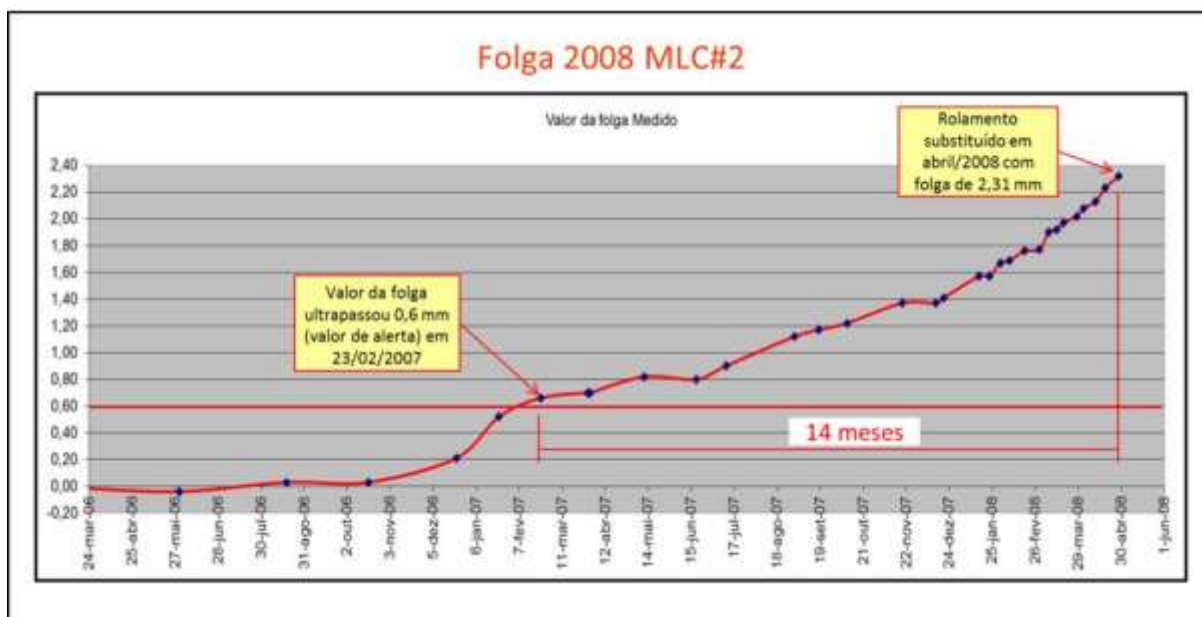
Também foi realizada uma análise referente a frequência de inspeção da folga desse Rolamento. Nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 podem ser vistos os intervalos P-F dos três eventos de falha que já ocorreram nos Rolamentos.

Figura 4.6 – Intervalo P-F da falha do Rolamento da Máquina 01 em 2003



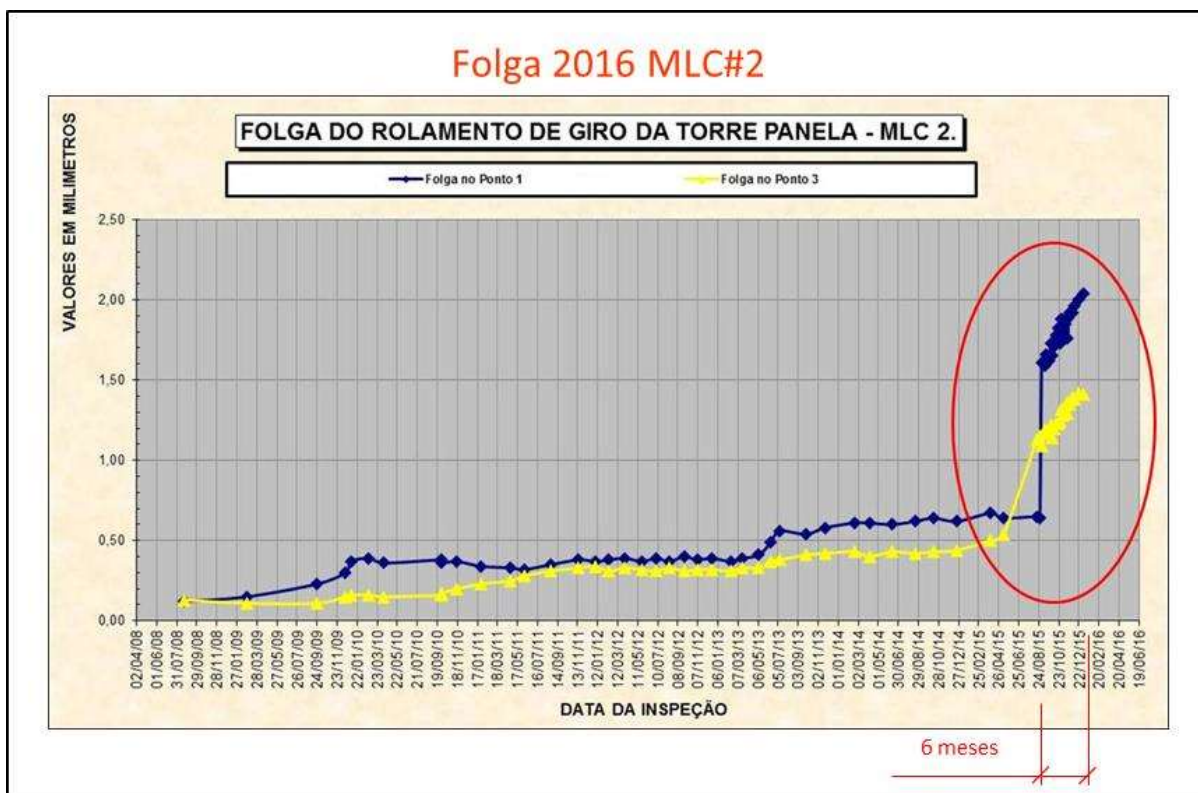
Fonte: o autor (2017).

Figura 4.7 – Intervalo P-F da falha do Rolamento da Máquina 02 em 2008



Fonte: o autor (2017).

Figura 4.8 – Intervalo P-F da falha do Rolamento da Máquina 02 em 2016



Fonte: o autor (2017).

Observa-se nesses dados, que existem 3 intervalos P-F distintos: 12, 14 e 06 meses. Esses dados, na verdade, referem-se ao intervalo entre a percepção do

início da falha e a troca do Rolamento, não efetivamente a sua falha. Nessa última ocorrência, de 2016, o Rolamento poderia ter tido uma vida mais longa, entretanto, optou-se pela sua troca naquele momento porque houve uma parada também do Convertedor e, parando esses equipamentos simultaneamente, a perda de produção da empresa seria minimizada. Portanto, o intervalo P-F para este Rolamento pode ser considerado de aproximadamente 12 meses. Com essa análise, ficou definido que a medição de folga do Rolamento deve ocorrer a cada três meses, visto que, após atingido o valor de alerta, numerosas atividades ainda precisam ser desenvolvidas até o momento da troca, incluindo a contratação de várias empresas, aquisição de materiais, o planejamento e a programação da troca, etc.

#### 4.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi explicado como foram coletados os dados para a análise e informado que eles são 100% confiáveis. Esses dados foram mostrados, sendo indicados se eram referentes a falhas ou suspensões.

A seguir, esses dados foram inseridos no software Weibull++ versão 11 da ReliaSoft e foram processados. Os resultados foram apresentados e analisados. A informação mais relevante é que o rolamento está falhando por vida prematura.

Baseado nessa informação e também nas análises de falhas realizadas nos Rolamentos que falharam, foi elaborado um FMEA para tratar especificamente os modos de falha relativos a montagem do Rolamento, pois as falhas prematuras foram atribuídas a desvios de montagem. As saídas do FMEA foram incluídas em um padrão elaborado especificamente para a troca deste Rolamento.

No capítulo seguinte, será apresentada a conclusão de toda essa análise e como ela contribuiu para auxiliar nas tomadas de decisão a respeito desse importante ativo na ArcelorMittal Tubarão.

## 5 CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta as conclusões do trabalho e também são feitas sugestões para trabalhos futuros relativos ao mesmo tema.

A análise dos dados existentes com o software Weibull++ versão 11 possibilitou a obtenção do modelo probabilístico das falhas. O Weibull 3-P foi o que mostrou melhor aderência, com um coeficiente de correlação muito próximo de 1.

Analisando o resultado obtido, verificou-se que o parâmetro de forma  $\beta$  confirmou estatisticamente que os Rolamentos tiveram falhas prematuras. As análises das falhas ocorridas já indicavam esse fato.

Foram realizadas várias simulações com o modelo e obtidos valores de confiabilidade para o Rolamento. Foi possível verificar que o tempo médio até a falha (MTTF) do Rolamento é igual a 14,9 anos (vida média). Mesmo que um Rolamento nunca tenha atingido essa vida, ela é calculada baseada no modelo probabilístico, que considera também os componentes em suspensão e sua probabilidade de vida futura.

Apesar de terem sido realizadas várias simulações, os resultados obtidos não podem ser considerados como a confiabilidade de projeto do Rolamento, pois o parâmetro de forma  $\beta$  menor do que 1 confirmou que está ocorrendo mortalidade infantil deste componente. Os reais valores da sua confiabilidade de projeto poderão ser calculados futuramente, quando o fator de forma atingir o valor igual a 1. Não é esperado um valor acima deste, uma vez que rolamentos apresentam falhas aleatórias, conforme diversos estudos já realizados sobre rolamentos, inclusive um deles mencionado no Guia de RCM da NASA, publicado em 2008. É possível inferir que os resultados da confiabilidade de projeto deste Rolamento serão melhores do que os calculados neste trabalho, pois sem as falhas prematuras, suas vidas serão mais longas.

O parâmetro de vida mínima (gama) do modelo Weibull 3-P indica que não é necessária a aquisição de um Rolamento para estoque até que a vida do que estiver operando atinja 7,57 anos. Mesmo com os desvios de montagem ocorridos no passado, a confiabilidade do Rolamento para uma vida menor do que essa é de 100%. Entretanto, para se tomar essa decisão é preciso realizar também uma análise de gestão de risco, pois caso aconteça algum evento inesperado que cause a redução da vida do Rolamento (por exemplo, um problema de fabricação ou uma



colisão da Panela de aço na Torre), haverá possibilidade de um grande impacto na produção da planta.

Em relação ao método de manutenção, novamente será analisado o parâmetro de forma  $\beta$ . Como seu valor é menor do que 1, não é recomendada uma manutenção baseada no tempo, ou seja, trocar o Rolamento baseado no seu tempo de operação. Isso se deve ao fato de que, para valores de  $\beta$  menores do que 1, a taxa de falha é decrescente com o tempo e, por isso, um componente que já está operando possui probabilidade de falha menor do que um componente novo. Por isso, uma troca baseada no tempo seria incoerente. Embora a literatura recomende manutenção corretiva para os casos em que  $\beta$  for menor do que 1, para este Rolamento o controle mais adequado é o preditivo de medição de folga e análise da graxa, conforme registrado no FMEA. Isso se justifica porque, após a identificação do desgaste do componente (prematureo ou não), é necessário um longo tempo de planejamento para a sua troca. Portanto, não é recomendável adotar apenas a manutenção corretiva para este caso.

Com o desenvolvimento deste trabalho, foi possível adquirir mais conhecimentos sobre o comportamento das falhas desses Rolamentos. Os valores da confiabilidade em função do tempo (apesar de “contaminados” por falhas prematuras), do parâmetro de vida mínima e do MTTF, certamente servirão de referência para futuras tomadas de decisão a respeito deste importante componente de uma unidade de lingotamento contínuo.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a ocorrência de novas falhas, esse trabalho poderá ser atualizado para a obtenção de valores atualizados para os parâmetros da distribuição. Quando o parâmetro  $\beta$  atingir valor igual a 1, poderão ser obtidas todas as estatísticas de confiabilidade desejadas para esse componente. Nessa ocasião, a confiabilidade calculada realmente será aquela relativa ao projeto do Rolamento.

Também poderá ser desenvolvido um estudo para se analisar os dados de falha de vários Rolamentos similares em máquinas de Lingotamento Contínuo ao redor do mundo. Essa análise poderá servir, por exemplo, para avaliar se

determinado projeto de Torre é mais ou menos robusto do que outros, comparativamente.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.

FOGLIATTO, Flávio S.; RIBEIRO, José L. D. Confiabilidade e Manutenção Industrial. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

Knezevic, Jezdimir. Reliability, Maintainability and Supportability – A probabilistic approach. England: McGRAW-HILL Book Company Europe, 1993.

Mannesmann Demag. Manual de Operação e Manutenção da Máquina de Lingotamento Contínuo n. 1 - Vol. 3. Serra-ES, 1995.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Reliability – Centered Maintenance Guide For Facilities and Collateral Equipment. NASA, 2008.

ReliaSoft Corporation. Life Data Analysis Reference Book. USA, 2015.

ReliaSoft Education. RS 401 - Análise de Dados de Vida.

Rigoni, Emerson; Mariano, Carlos H. Aspectos Operacionais – Distribuições aplicadas à Confiabilidade – Determinação do ajuste. 2017.

WEIBULL ++, Versão 11. Tucson, AZ, USA, Relisoft Corporation, 2017.