

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

**WELLIGTON JOSÉ FERNANDES MOREIRA**

**ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO E CONFIABILIDADE DE UM FORNO  
DE INDUÇÃO TIPO *CORELESS***

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2019**

**WELLIGTON JOSÉ FERNANDES MOREIRA**

**ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO E CONFIABILIDADE DE UM FORNO  
DE INDUÇÃO TIPO *CORELESS***

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

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rigoni

Co-orientador: Prof. José Flávio Ramos Jr

**CURITIBA**

**2019**



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 DE DEGRADAÇÃO E CONFIABILIDADE DE UM FORNO DE INDUÇÃO TIPO CORELESS

por

WELLIGTON JOSÉ FERNANDES MOREIRA

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

---

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

---

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

---

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

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

Dedico este trabalho à minha esposa Tânia e aos meus filhos Bia e Pedro, pela compreensão nos momentos de ausência.

Aos meus colegas da ArcelorMittal Vega e em especial ao meu gestor Luciano Colzani, pelo apoio recebido no desenvolvimento deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho tem um importante significado para mim, pois é uma conquista tanto pessoal como profissional. Mas sem o incentivo de algumas pessoas, esta conquista teria sido muito mais difícil. Portanto, quero mencionar aqui aqueles que fizeram parte deste momento da minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Emerson Rigoni, pelas valiosas contribuições e pela sabedoria com que nos guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas da turma de Engenharia da Confiabilidade de 2018/2019, sou grato a todos vocês. Mas sou especialmente grato aos meus amigos de turma e também de empresa, Rogério Pereira, André Caires e Jefferson Gonçalves, que compartilharam comigo seus conhecimentos durante todo o tempo que nos dedicamos ao estudo da Confiabilidade. Aprendi que vocês são realmente amigos confiáveis.

Agradeço também à secretaria do curso, pela cooperação e presteza nas solicitações.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, especialmente à minha esposa Tânia, pois sem o apoio e a compreensão deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Mas certamente tudo isso só foi possível porque a ArcelorMittal Vega, empresa que eu trabalho, acredita no potencial dos seus empregados e os incentiva na busca do conhecimento.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa, os meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

MOREIRA, Wellington J. F. **Análise de degradação e confiabilidade de um forno de indução tipo *coreless***. 2019. 89 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Os fornos de indução são largamente aplicados nas indústrias de fundição, sendo também um dos indispensáveis em uma linha de galvanização por imersão a quente, onde são utilizados tanto os modelos de forno a canal como *coreless*. Os fornos de indução a canal são usados no processo principal de revestimento, onde a chapa de aço em movimento é mergulhada no pote de trabalho para receber uma camada de liga metálica protetiva. Para manter o nível do banho de revestimento, lingotes são imersos diretamente no pote principal. Estando em contato com o banho aquecido, estes lingotes são fundidos, repondo desta forma o metal que foi consumido no processo de revestimento. Entretanto, pode ser necessário o uso de fornos auxiliares apenas para fazer a fusão destes lingotes em separado, evitando que este processo ocorra diretamente no banho de revestimento do pote principal, assim comprometendo a qualidade do revestimento. A Linha de Galvanização N° 2 da ArcelorMittal Vega utiliza um pote *coreless* auxiliar para o processo de material Galvalume®. Com o tempo de uso, o revestimento refratário deste pote tende a se degradar, ao ponto de torná-lo inoperante. Garantir a confiabilidade deste pote não tem se mostrado tarefa simples, uma vez que não é possível esvaziá-lo para inspeção e o seu funcionamento deve ser ininterrupto, sob risco de solidificação do banho metálico e a perda de toda a instalação, trazendo grandes prejuízos para o processo produtivo. Este trabalho tem o objetivo de fazer uma análise da degradação deste revestimento refratário, a partir da corrente elétrica de alimentação da bobina, aplicando as teorias relacionadas ao estudo da Engenharia da Confiabilidade, visando a antecipação de eventuais falhas que possam comprometer a disponibilidade e a confiabilidade do forno de indução *coreless* da Linha de Galvanização N° 2 da ArcelorMittal Vega.

**Palavras-chave:** Fornos de Indução. Forno *coreless*. Confiabilidade. Disponibilidade. Análise de Dados de Vida. Análise de Dados de Degradação.

## ABSTRACT

MOREIRA, Wellington J. F. **Degradation and reliability analysis of a *coreless* induction furnace.** 2019. 89 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Induction furnaces are widely used in the foundry industries and are also one of the key equipment in a hot dip galvanizing line where both channel and *coreless* induction furnaces types are used. Channel induction furnaces are used in the main coating process, where the moving steel plate is dipped into the working pot to receive a protective alloy layer. To maintain the level of the melting bath, ingots are immersed directly into the main pot. Being in direct contact with the heated bath, these ingots are melted, thus replacing the metal that was consumed in the coating process. However, it may be necessary to use auxiliary furnaces only to melt these ingots separately, preventing this process from occurring directly in the main pot melting bath, what could compromise the coating quality. ArcelorMittal Vega Galvanization Line 2 utilizes an auxiliary *coreless* pot for the Galvalume® material process. Over time, the refractory lining of this pot tends to degrade to the point of rendering it inoperative. Ensuring the reliability of this pot has not been a simple task, as it cannot be emptied for inspection and its operation must be uninterrupted, as the metal bath may solidify and the entire installation may be lost, causing enormous damage to the production process. This work aims to make an analysis of the degradation of this refractory lining, from the electrical supply current of the coil, applying the theories related to the reliability engineering study, in order to anticipate eventual failures that may compromise the *coreless* induction furnace availability and reliability.

**Palavras-chave:** Induction Furnaces. *Coreless* Furnaces. Asset Reliability. Asset Availability. Life Data Analysis. Degradation Data Analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Seção de Entrada.....	21
Figura 2.2 – Seção de Processo – Desengraxe e Forno de Recozimento Contínuo....	21
Figura 2.3 – Seção de Processo – Galvanização e Tratamento de Superfície.....	22
Figura 2.4 – Seção de Saída.....	23
Figura 2.5 – Abastecimento do Pote Principal pelo Pote Auxiliar.....	25
Figura 2.6 – Sentido das Correntes Elétricas e Movimento de Agitação Induzido.....	26
Figura 2.7 – Forma Construtiva de um Forno de Indução a Canal.....	27
Figura 2.8 – Forma Construtiva de um Forno de Indução <i>Coreless</i> .....	28
Figura 2.9 – Movimento de Agitação Induzido.....	31
Figura 2.10 – Efeitos da Variação da Espessura do Revestimento Refratário.....	33
Figura 3.1 – Dados Completos.....	39
Figura 3.2 – Dados Censurados à Direita.....	40
Figura 3.3 – Dados Censurados em Intervalo.....	41
Figura 3.4 – Dados Censurados à Esquerda.....	41
Figura 3.5 – Representação Gráfica do Parâmetro de Localização.....	44
Figura 3.6 – Função pdf da Distribuição Exponencial.....	45
Figura 3.7 – Funções pdf da Distribuição Weibull para Diferentes Valores de $\beta$ .....	48
Figura 3.8 – Funções Taxa de Falha Weibull para Diferentes Valores de $\beta$ .....	49
Figura 3.9 – Funções pdf da Distribuição Weibull para Diferentes Valores de $\eta$ .....	49
Figura 3.10 – Representação do Modelo de Degradação Linear.....	53
Figura 3.11 – Representação do Modelo de Degradação Exponencial.....	54
Figura 3.12 – Representação do Modelo de Degradação Potência.....	55
Figura 3.13 – Representação do Modelo de Degradação Logarítmico.....	55
Figura 3.14 – Relação entre as Etapas da Análise de Degradação Não-Destrutiva....	57
Figura 3.15 – Distribuição de Degradação e de Tempo de Falha.....	61
Figura 4.1 – Potência, Corrente, Tensão e Frequência da Bobina do Forno .....	63
Figura 4.2 – Valores de Potência, Corrente, Tensão e Frequência da Bobina.....	63
Figura 4.3 – Valores de Potência e Corrente da Bobina em 20 de Agosto de 2018....	65
Figura 4.4 – Carregamento dos Dados no Weibull++.....	67
Figura 4.5 – Ranqueamento dos Modelos de Degradação.....	68
Figura 4.6 – Ranqueamento dos Modelos de Distribuição.....	69
Figura 4.7 – Relatório de Resultados para o Modelo de Degradação Lloyd-Lipow....	69
Figura 4.8 – Relatório de Tempos Extrapolados de Falha.....	70
Figura 4.9 – Relatório Resultados dos Dados de Vida.....	71
Figura 4.10 – Curva de Degradação x Tempo.....	73
Figura 4.11 – Função Densidade de Probabilidade pdf ou $f(t)$ .....	74
Figura 4.12 – Curva de Confiabilidade x Tempo.....	75
Figura 4.13 – Cálculo da Confiabilidade para 5 Anos de Operação.....	76
Figura 4.14 – Vida Média (MTBF) do Forno Premelt.....	76
Figura 4.15 – Curva de Probabilidade de Falha x Tempo.....	77
Figura 4.16 – Cálculo da Probabilidade de Falha para 5 Anos de Operação.....	78
Figura 4.17 – Curva de Taxa de Falha x Tempo.....	79
Figura 4.18 – Cálculo da Taxa de Falha para 5 Anos de Operação.....	79
Fotografia 2.1 – Vista Externa de um Forno a Canal.....	24
Fotografia 2.2 – Processo de Revestimento com Alumínio de uma Chapa de Aço.....	24



Quadro 4.1 – Valores de corrente da bobina entre 20/04/2019 a 29/07/2019.....64

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### LISTA DE ABREVIATURAS

V	Unidade de Tensão Elétrica (Volt)
A	Unidade de corrente elétrica (Ampère)
W	Unidade de potência elétrica ativa (Watt)
Hz	Unidade de frequência elétrica (Hertz)
VA	Unidade de potência elétrica aparente (Volt-Ampère)

### LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
<i>cdf</i>	Cumulative Distribution Function
HDG	<i>Hot Dip Galvanizing</i>
LDA	<i>Life Data Analysis</i>
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i>
MTBF	<i>Mean Time Before Failure</i>
NBR	Norma Técnica Brasileira
<i>pdf</i>	<i>Probability Density Function</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
QCP	<i>Quick Calculation Pad</i>
TTF	<i>Time-To-Failure</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\beta$  (Beta) – Parâmetro de forma da distribuição Weibull

$\eta$  (Eta) – Parâmetro de escala da distribuição Weibull

$\gamma$  (Gama) – Parâmetro de localização da distribuição Weibull

$\lambda$  (Lambda) – Taxa de Falha

$\mu$  (Mi) – Média

$\sigma$  (Sigma) – Desvio padrão

$e$  (Constante de Neper) – Base dos logaritmos naturais (aprox. 2,718281)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA.....	13
1.2	OBJETIVOS .....	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	15
1.2.2	Objetivos Específicos .....	15
1.3	JUSTIFICATIVA .....	15
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	16
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2</b>	<b>TEMA OU ÁREA DE APLICAÇÃO</b> .....	18
2.1	PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO A QUENTE .....	18
2.1.1	Seção de Entrada.....	18
2.1.2	Seção de Processo .....	19
2.1.3	Seção de Saída.....	21
2.2	OS FORNOS DE INDUÇÃO NO PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO ....	22
2.3	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE FORNOS DE INDUÇÃO .....	25
2.3.1	Forno de Indução a Canal .....	26
2.3.2	Forno de Indução <i>Coreless</i> .....	27
2.4	CARACTERÍSTICAS DO FORNO CORELESS DA LINHA DE GALVANIZAÇÃO N°2 DA ARCELORMITTAL VEGA.....	28
2.5	ALTERAÇÕES NO REVESTIMENTO REFRAATÁRIO E SUAS CONSEQUÊNCIAS PARA A CONFIABILIDADE DO FORNO.....	29
2.6	MOVIMENTO DE AGITAÇÃO INDUZIDO DO BANHO E SEUS EFEITOS NO DESGASTE DO REVESTIMENTO REFRAATÁRIO .....	30
2.7	O PROCESSO DE FORMAÇÃO DE BUILDUP E SEUS EFEITOS NO REVESTIMENTO REFRAATÁRIO .....	32
2.8	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	35
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	36
3.1	HISTÓRICO E CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE CONFIABILIDADE	36
3.2	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA .....	38
3.2.1	Classificação dos Dados de Vida .....	38
3.2.1.1	Dados Completos.....	39
3.2.1.2	Dados Censurados.....	40
3.2.1.2.1	Dados Censurados à Direita (Suspensão) .....	40
3.2.1.2.2	Dados Censurados em Intervalo .....	41
3.2.1.2.3	Dados Censurados à Esquerda.....	42
3.3	MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE DADOS DE VIDA .....	42
3.3.1	Distribuição Exponencial .....	44
3.3.2	Distribuição Weibull .....	46
3.3.2.1	Distribuição Weibull Biparamétrica .....	47
3.3.2.2	Características da Distribuição Weibull .....	48
3.3.2.2.1	Efeitos do Parâmetro de Forma $\beta$ .....	48
3.3.2.2.2	Efeitos do Parâmetro de Escala $\eta$ .....	49
3.3.3	Distribuição Normal .....	50
3.3.4	Outras Distribuições .....	51
3.3.5	Estimativa de Parâmetros .....	51
3.4	ANÁLISE DE DADOS DE DEGRADAÇÃO .....	51
3.4.1	Modelos de Degradação .....	52

3.4.1.1	Modelo de Degradação Linear .....	54
3.4.1.2	Modelo de Degradação Exponencial.....	54
3.4.1.3	Modelo de Degradação Potência .....	55
3.4.1.4	Modelo de Degradação Logarítmico.....	55
3.4.1.5	Modelo de Degradação Gompertz.....	56
3.4.1.6	Modelo de Degradação Lloyd-Lipow .....	56
3.4.2	Tipos de Análise de Degradação.....	57
3.4.2.1	Análise de Degradação Não-Destrutiva .....	57
3.4.2.2	Análise de Degradação Destrutiva .....	59
3.4.2.2.1	Modelando a Análise de Degradação Destrutiva .....	59
3.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	62
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>63</b>
4.1	LEVANTAMENTO E PREPARAÇÃO DOS DADOS.....	63
4.2	ANÁLISE DOS DADOS NO <i>SOFTWARE</i> WEIBULL++ .....	67
4.3	GRÁFICOS DE TENDÊNCIA E MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE.....	73
4.4	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	81
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>82</b>
5.1	SÍNTESE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES RESULTANTES.....	82
5.2	DIFICULDADES ENCONTRADAS E SOLUÇÕES.....	83
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>86</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No campo da siderurgia, o processo de galvanização de aço ocupa lugar de destaque, por conferir alto valor agregado ao produto final. Através deste processo, a chapa de aço é revestida com ligas de metais resistentes à corrosão. Dentre as atuais tecnologias de revestimento, a Galvanização por Imersão a Quente (HDG) é uma das mais utilizadas, dada a sua vantajosa relação de custo-benefício.

Neste processo de galvanização, os fornos de indução são amplamente utilizados, pois são nestes equipamentos que a chapa de aço é revestida com uma camada de liga metálica que protegerá o aço da corrosão. Nestes fornos, uma grande massa de metal líquido é mantida acima da temperatura de fusão, através de potentes indutores instalados nas laterais do forno.

À medida que o aço vai sendo revestido, em um processo contínuo, o nível do banho de metal líquido vai decrescendo, o que requer a sua reposição. Tal reposição é feita através da imersão de lingotes sólidos nas extremidades do forno. Ao entrarem em contato com o banho metálico em alta temperatura, estes lingotes se fundem, repondo o nível do banho.

Entretanto, dependendo da liga de metal que será usada para revestimento, esta imersão de lingotes diretamente no pote principal pode trazer inconvenientes, tal como a produção indesejada de impurezas que comprometem a qualidade do revestimento. Assim, fornos auxiliares são utilizados para fundir os lingotes e, por transbordo, o metal líquido deste pote auxiliar é conduzido por uma calha até o pote principal.

Um dos grandes desafios para as equipes de manutenção é determinar a condição da parede refratária deste forno de pré-fusão, pois sabe-se que ao longo do tempo, ocorrem dois processos que podem comprometer o funcionamento adequado do forno:

- a) Desgaste da parede refratária do forno, reduzindo a espessura da parede e, conseqüentemente, a isolamento da bobina de aquecimento do banho metálico, o que favorece a infiltração de zinco na parede e a falha elétrica do forno por fuga de corrente.

- b) Depósito de material em estado semissólido nas laterais e no fundo do forno, reduzindo a área útil do forno e, conseqüentemente, a efetividade de transferência de calor para o banho.

Como não é possível controlar diretamente a espessura da parede refratária do forno de pré-fusão, este trabalho busca definir, utilizando as ferramentas da engenharia da confiabilidade, uma metodologia que permita avaliar esta condição, de forma a antecipar condições críticas que possam tornar o forno inoperante.

## 1.1 PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA

O estudo será realizado nas instalações da Linha de Galvanização N° 2 da ArcelorMittal Vega, localizada em São Francisco do Sul, Santa Catarina. O equipamento que servirá de base para este estudo é o Forno Auxiliar de Pré-Fusão de Alumínio-Zinco, comumente denominado Premelt, o qual tem a função de fazer a fusão dos lingotes para reposição do nível do banho do forno principal de revestimento para materiais Galvalume®.

Sabe-se que a partir dos primeiros momentos de uso, o revestimento refratário do interior do forno começa a sofrer alterações, tanto por desgaste da espessura da parede como por acumulação de resíduos decorrentes do próprio processo de fusão. Estas alterações são responsáveis por conseqüências indesejáveis no funcionamento do forno, como por exemplo, a infiltração de metal líquido no material refratário. Este metal, entrando em contato com as espiras da bobina de aquecimento do banho metálico, provocam o desarme do painel de alimentação, devido a atuação da proteção de fuga à terra.

Neste caso, não resta outra solução a não ser o esvaziamento do forno de pré-fusão para refazer a parede refratária, bem como o reparo do isolamento das espiras da bobina. Este reparo demora em média 30 dias, período no qual o forno fica inoperante e os aços que requerem revestimento à base de liga de Alumínio-Zinco não podem ser processados, resultando em grandes perdas operacionais.

De forma a monitorar as condições da bobina, as principais grandezas elétricas e outras variáveis são registradas, dentre elas:

- Potência elétrica de saída: Indica quanto de potência ativa está sendo aplicada na bobina. Varia de acordo com a temperatura do banho metálico, buscando manter esta temperatura no valor de referência.
- Corrente elétrica da bobina: Indica quanto de corrente circula na bobina para aquecer o banho na temperatura desejada.
- Tensão elétrica da bobina: Indica quanto de tensão está sendo aplicada nos terminais da bobina de modo a fazer circular a corrente necessária para aquecer o banho.
- Temperatura do banho: Principal variável de controle e, devido à sua criticidade, é medida por dois termopares redundantes instalados no banho. A potência aplicada na bobina varia de forma a responder às variações de temperatura do banho, que deve ser mantida próximo do valor de referência.
- Corrente de fuga à terra: Esta corrente, em condições normais de funcionamento, oscila próximo do valor de 3 mA. Caso ocorra qualquer anormalidade que faça esta corrente subir, a instalação será desligada de forma a evitar que a falha se agrave.

Atualmente, a principal dificuldade é a falta de evidências que tornem possível resolver o seguinte problema:

- Como determinar de forma assertiva que o desgaste do revestimento refratário ou a deposição de escória nas laterais e na base do forno estão se aproximando de valores críticos?

Decorrentes desta questão principal surgem ainda outras questões, cujas respostas garantem o cumprimento dos objetivos deste trabalho:

- Qual ou quais variáveis podem ser usadas para inferir a condição do revestimento refratário das paredes do forno, uma vez que a espessura da parede não pode ser controlada diretamente?
- É possível estabelecer um momento adequado para se efetuar a substituição do revestimento refratário de forma planejada, antes que o forno se torne definitivamente inoperante?

As respostas a estas perguntas compreendem os objetivos deste trabalho.



## 1.2 OBJETIVOS

Com o presente trabalho, busca-se alcançar objetivos tanto geral quanto específicos, os quais são apresentados a seguir.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Identificar as principais metodologias da Engenharia da Confiabilidade que podem ser aplicadas na avaliação da condição do revestimento refratário de fornos de indução *coreless*, buscando identificar em cada metodologia, sua abrangência, precisão, esforço depreendido, confiabilidade, bem como as suas complementaridades, visando o aumento da disponibilidade e confiabilidade do equipamento objeto desta pesquisa.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho deverá atender também aos seguintes objetivos específicos, para cumprimento do seu objetivo geral:

- Identificar as variáveis de controle que permitem inferir as condições do revestimento refratário do forno de indução auxiliar Premelt, bem como implementar uma base de dados consistente destas variáveis.
- Identificar demais fatores que podem influenciar nas condições operacionais e na vida útil do revestimento refratário.
- Desenvolver um modelo de avaliação da degradação do revestimento refratário, aplicando os conceitos de engenharia de confiabilidade, de forma a antecipar possíveis falhas decorrentes deste processo de degradação.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Desde a entrada em operação do forno Premelt em 2010, foi necessário refazer o revestimento refratário deste forno por três vezes: agosto de 2016, dezembro de 2017 e junho de 2018. As duas primeiras ocorrências tiveram como causa a infiltração de metal líquido no revestimento refratário, tornando o forno inoperante.

Este cenário se torna ainda mais grave dada à disparidade de tempo entre a entrada em operação e a primeira infiltração e entre esta e a segunda infiltração. Enquanto o primeiro caso de infiltração ocorreu 6 anos após a entrada em operação, o segundo ocorreu apenas 18 meses após a substituição do revestimento refratário.

Portanto, é preciso conhecer os fenômenos que causam danos ao revestimento refratário do forno de forma a implementar métodos de controle direto e indiretos dos agentes causadores destes danos.

A reforma deste forno consome consideráveis recursos financeiros, além de demandar longo tempo de parada do equipamento, o que impacta fortemente o planejamento da produção e o atendimento a clientes, sobretudo pelo fato desta reforma ocorrer de forma não planejada.

A realização dos objetivos geral e específicos propostos certamente contribuirá para a redução destes impactos financeiros e operacionais, bem como permitirá o desenvolvimento de pessoas que integram as equipes de manutenção e operação dos fornos, através da aquisição do conhecimento e da aplicação das técnicas de confiabilidade.

#### 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A presente pesquisa trata-se de uma pesquisa aplicada, pois do cumprimento dos seus objetivos espera-se alcançar soluções práticas para garantir a confiabilidade e a disponibilidade do forno Premelt.

Trata-se também de uma pesquisa de campo, pois serão utilizados dados coletados em campo para posterior análise de tendências do equipamento em questão.

Para melhor obtenção dos resultados, este trabalho estará focado em dois aspectos distintos relativos ao forno Premelt: o primeiro aspecto, qualitativo, visa compreender o princípio de funcionamento dos fornos à indução e os agentes responsáveis pelos danos no revestimento refratário e pelas alterações no desempenho operacional do forno. O segundo aspecto, quantitativo, procurará identificar as variáveis que possam indicar, mesmo que indiretamente, o estado de degradação do revestimento refratário, uma vez que o forno se encontra permanentemente carregado, impedindo que sejam realizadas inspeções visuais e medições no seu interior.

Em seguida, estes dados serão coletados e preparados para serem utilizados em conjunto com algumas das ferramentas de análise quantitativa da confiabilidade, visando criar um modelo que reflita a condição atual do revestimento refratário, bem como seja possível prever, com certo grau de certeza, o tempo que o forno poderá permanecer em funcionamento sem atingir condição crítica de operação e o momento adequado de substituição planejada do revestimento refratário do mesmo.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho se divide em cinco capítulos, os quais se inter-relacionam e se complementam para atender aos objetivos propostos.

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução, com informações de caráter geral do estudo proposto.

O Capítulo 2 apresenta o tema e a área de aplicação que será desenvolvido o trabalho. Este capítulo mostra a composição de uma linha de galvanização a quente, o princípio de funcionamento de fornos de indução a canal e *coreless*, bem como os problemas apresentados pelo mesmo e como estes problemas impactam o processo produtivo. Maior destaque é dado ao fenômeno de erosão do refratário e deposição de escória no revestimento refratário, de modo a embasar os capítulos subsequentes, que buscam apresentar formas de controle adequadas a estes problemas.

O Capítulo 3 contém o referencial teórico, que é a fundamentação das principais ferramentas de confiabilidade utilizadas ao longo da pesquisa, tanto no seu aspecto qualitativo como quantitativo. Serão abordadas as principais ferramentas que suportam a pesquisa, tais como Análise de Dados de Vida, com ênfase nos modelos de estudo de degradação.

O Capítulo 4 é onde o estudo de caso será desenvolvido. Neste capítulo serão definidas as variáveis de interesse e uma base de dados será analisada para aplicação das ferramentas de confiabilidade visando à obtenção de um modelo de avaliação do revestimento refratário do forno Premelt.

Por fim, o Capítulo 5 finaliza o trabalho mostrando as soluções encontradas, as conclusões, os benefícios alcançados, bem como as sugestões de trabalhos futuros, que possam se desdobrar na continuidade da busca constante da garantia da confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade do forno Premelt da Linha de Galvanização N° 2 da ArcelorMittal Vega.

## 2 TEMA OU ÁREA DE APLICAÇÃO

Neste capítulo será descrito o processo de galvanização a quente, bem como será detalhado o princípio de funcionamento de fornos de indução, com foco nos fornos tipo *coreless*, que é o objeto do presente trabalho.

### 2.1 PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO A QUENTE

Dentro do processo de fabricação de aços planos, voltado principalmente para aplicação na indústria automotiva, o subprocesso de galvanização a quente, também conhecido como HDG (*Hot Dip Galvanizing*), consiste em revestir chapas de aço com ligas de zinco, alumínio ou a combinação destes e de outros metais, com a finalidade de protegê-la contra os efeitos da corrosão ou de conferir características como formabilidade e soldabilidade, necessárias para a utilização posterior nas indústrias automotivas, de eletrodomésticos, entre outras.

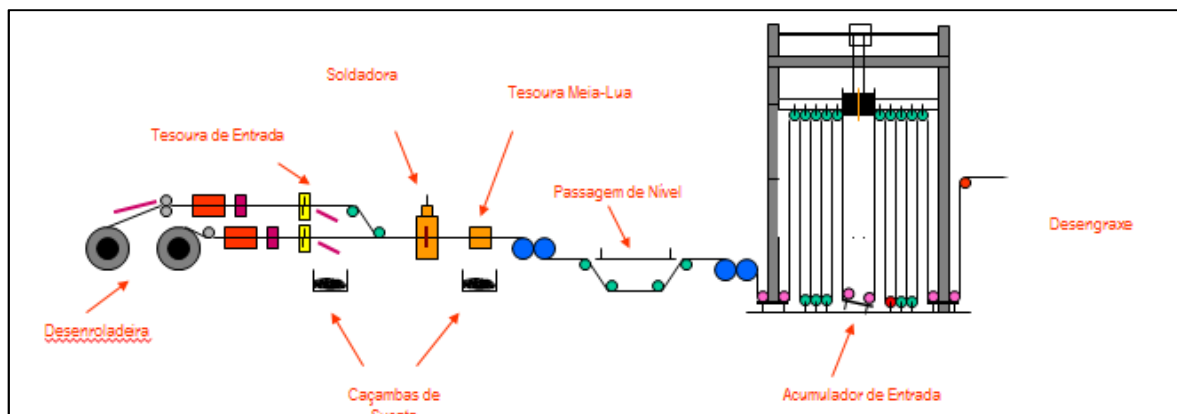
Uma linha de galvanização, cujo comprimento total de chapa estendida ao longo da linha pode variar entre 800 a 1600 m, é subdividida em três seções: Seção de Entrada, Seção de Processo e Seção de Saída, as quais são detalhadas a seguir.

#### 2.1.1 Seção de Entrada

A seção de entrada recebe as bobinas de aço e tem duas funções principais:

- 1) Garantir a continuidade do processo através da soldagem do fim de uma bobina no início da outra.
- 2) Manter um estoque de material no Acumulador de Entrada para manter a Seção de Processo em funcionamento, mesmo quando a entrada estiver parada para soldagem.

Figura 2.1– Seção de Entrada



Fonte: ArcelorMittal Vega (2019).

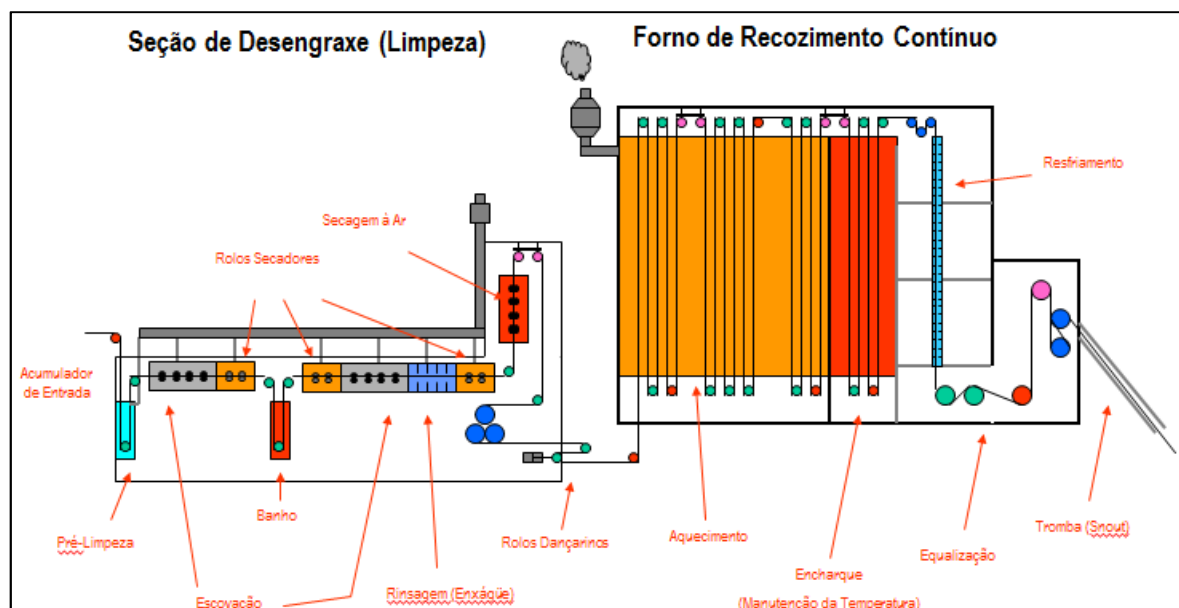
Observa-se à esquerda da Figura 2.1 que a seção de entrada possui 2 vias de carregamento de bobina (2 desenroladeiras). Enquanto uma bobina está sendo processada pela via 1, outra bobina estará sendo carregada na via 2, reduzindo assim o tempo de soldagem entre bobinas. Este tempo reduzido de soldagem aliado ao acúmulo de chapa no Acumulador de Entrada permite que a seção de processo permaneça em funcionamento mesmo com a seção de entrada parada para soldagem.

### 2.1.2 Seção de Processo

Esta seção pode ser subdividida em duas subseções:

- 1) Desengraxe e Forno de Recozimento Contínuo: No Desengraxe, a chapa de aço recebe tratamento de limpeza química e eletrolítica. No forno, a chapa de aço recebe tratamento térmico, preparando-a para o processo de galvanização.

Figura 2.2 – Seção de Processo – Desengraxe e Forno de Recozimento Contínuo

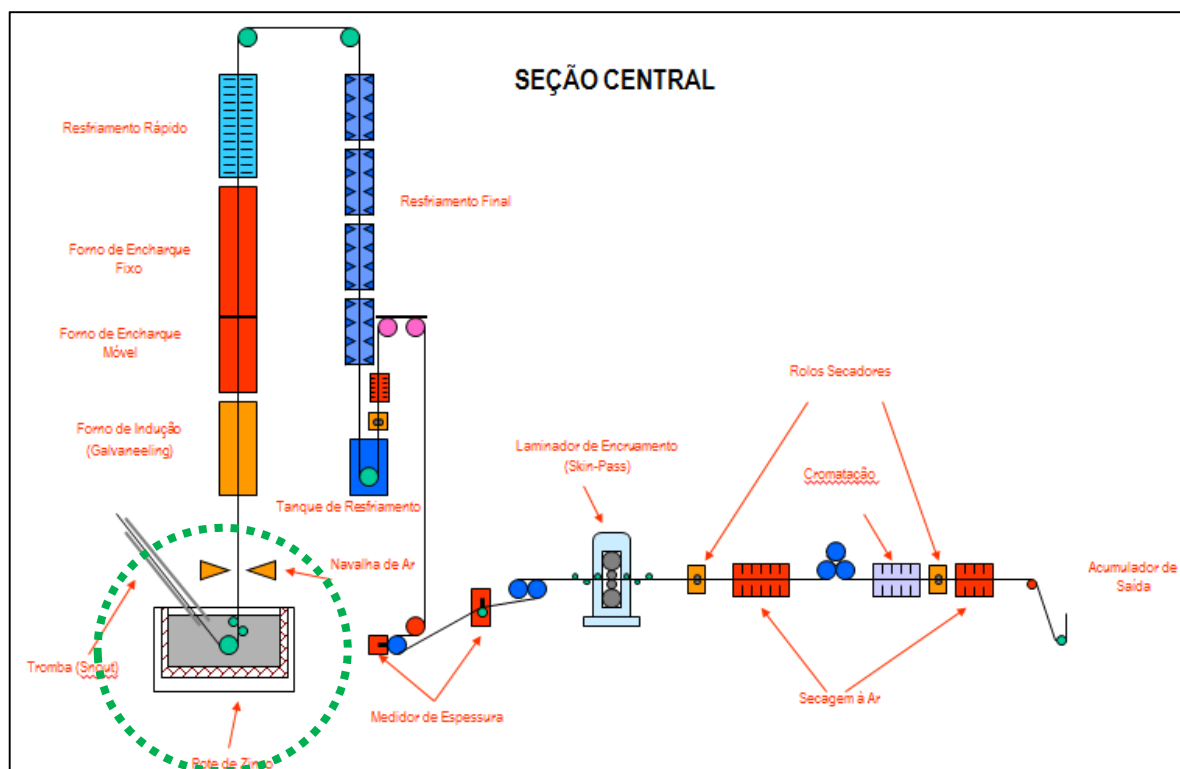


Fonte: ArcelorMittal Vega (2019).

Após a saída do forno, a chapa encontra-se pronta para receber o revestimento protetivo, o que ocorrerá na subseção seguinte.

- 2) Subseção de Galvanização: Esta é a área central de uma linha de galvanização a quente e o equipamento principal desta seção são os fornos de indução, comumente denominados potes, cuja principal função é conter ligas metálicas em estado líquido que serão usadas no revestimento.

Figura 2.3 – Seção de Processo – Galvanização e Tratamento de Superfície



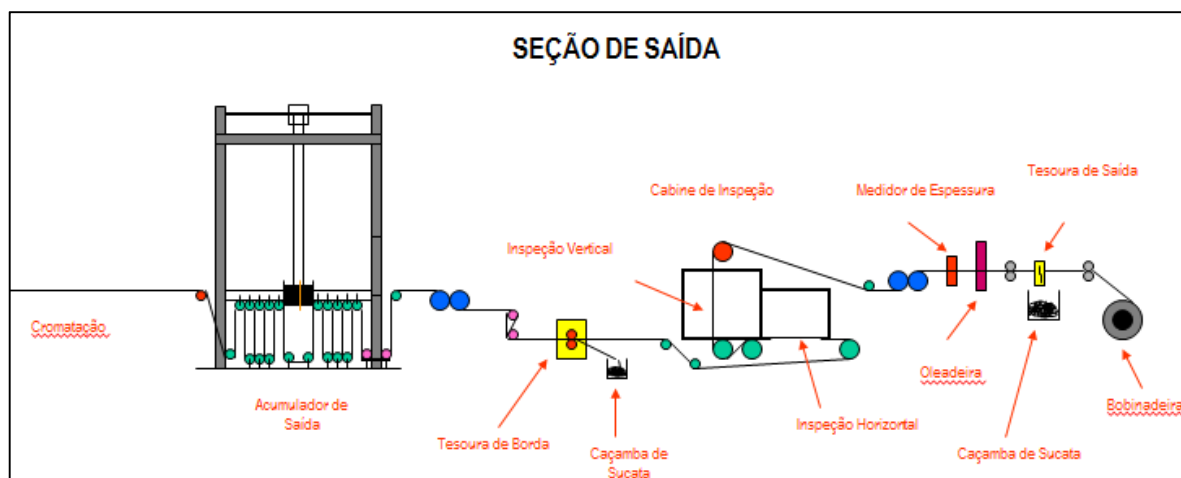
Fonte: ArcelorMittal Vega (2019).

A chapa de aço, que se encontra em movimento contínuo ao longo da seção de processo, é mergulhada no pote, onde é então revestida. Após ser resfriada e receber tratamentos adicionais, a chapa é conduzida para a seção de saída.

### 2.1.3 Seção de Saída

Nesta seção, a chapa de aço já revestida será rebobinada para ser enviada ao cliente final. Assim como na seção de entrada, um acumulador garante o funcionamento contínuo da seção de processo, mesmo com a seção de saída parada para que seja realizada a retirada da bobina de linha.

Figura 2.4 – Seção de Saída



Fonte: ArcelorMittal Vega (2019).

Na seção de saída completa-se o processo de galvanização. Uma bobinadeira coloca novamente a chapa em formato de bobina, a qual é transportada para o setor de expedição, de onde será encaminhada ao cliente final.

## 2.2 OS FORNOS DE INDUÇÃO NO PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO

No processo de galvanização de aço por imersão a quente os fornos de indução (potes) são equipamentos indispensáveis.

Os dois tipos de fornos de indução mais comuns são os fornos a canal e os fornos *coreless*, cujo princípio de funcionamento será explanado na seção 2.3.

Os pots principais das linhas de galvanização da ArcelorMittal Vega são todos do tipo forno a canal, cada um deles contendo uma liga metálica específica, utilizada para revestir a chapa de aço.

Estes fornos têm dupla função: manter em estado líquido o banho metálico usado no revestimento da chapa de aço e fazer a fusão dos novos lingotes que são inseridos diretamente no banho, de forma a repor o nível de trabalho.

Para que tais metais sejam mantidos em estado líquido, potentes indutores elétricos são utilizados, os quais aquecem o banho por meio de reações eletromagnéticas que ocorrem entre o indutor energizado e o banho metálico.

A Fotografia 2.1 mostra a estrutura externa de um forno a canal, em cujas laterais são montados os indutores para aquecimento do banho metálico.



Fotografia 2.1 – Vista Externa de um Forno a Canal



Fonte: ArcelorMittal Vega (2019).

Os potes são movimentados horizontalmente - entrando ou saindo da linha de produção conforme o material a ser processado - como verticalmente. Após estarem posicionados no eixo da linha de produção, o pote é elevado de forma a ficar na altura da linha de passe da chapa metálica, além de vedar com o próprio banho a cavidade de saída do forno contínuo, permitindo que a chapa saia deste forno já imersa no banho metálico e impedindo desta forma que a atmosfera do interior do forno contínuo seja contaminada com oxigênio.

Um rolo montado no interior do banho metálico faz a deflexão da chapa de aço, conduzindo-a verticalmente para a torre de resfriamento. O processo de revestimento em si ocorre durante esta passagem da chapa pelo banho metálico, o que é ilustrado na Fotografia 2.2. A seta indica o movimento da chapa de aço no sentido vertical, em direção à torre de resfriamento, após ter ser galvanizada. Neste processo, um equipamento denominado Navalha de Ar, localizado logo acima do banho metálico, é de fundamental importância no controle da espessura de revestimento, de acordo com o valor especificado para cada aplicação.

À medida que o nível do banho metálico decresce devido ao processo de revestimento, a reposição é feita por meio da imersão de lingotes sólidos diretamente no banho aquecido. À medida que estes se fundem, o nível do banho é mantido dentro da faixa de variação admissível.

Fotografia 2.2 – Processo de Revestimento com Alumínio de uma Chapa de Aço



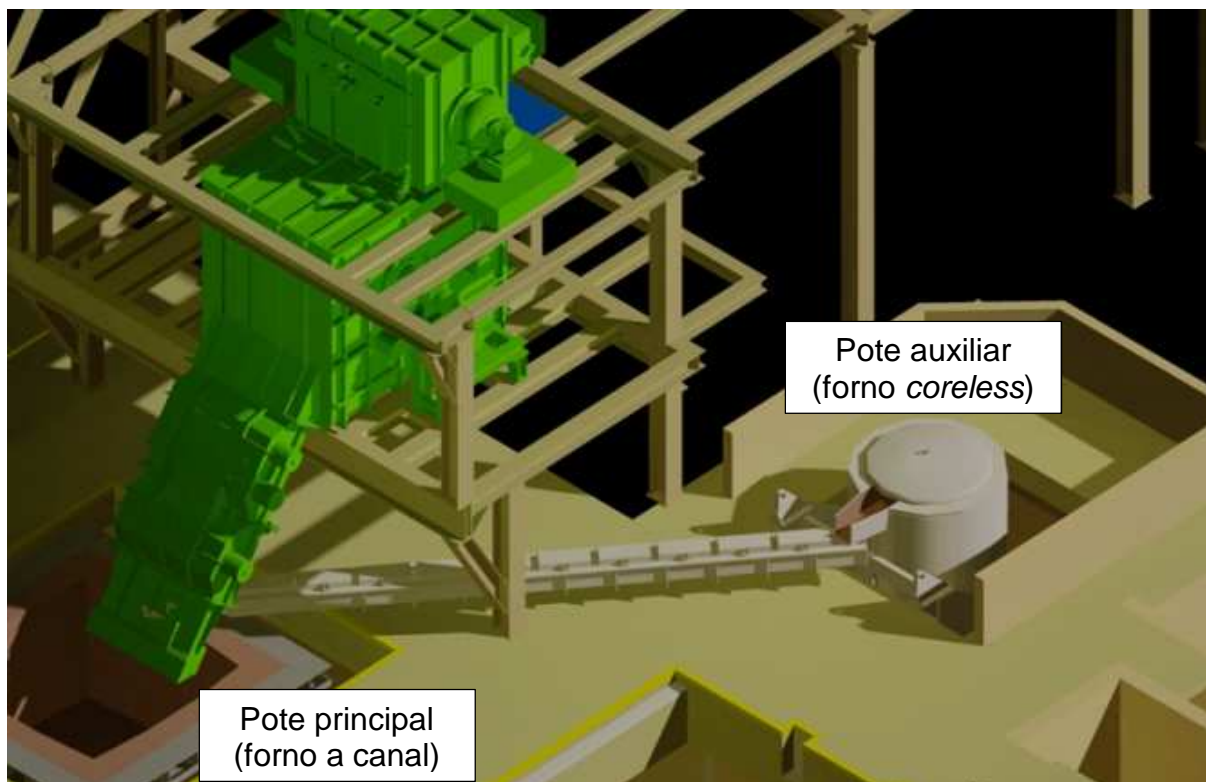
Fonte: ArcelorMittal Vega (2019).

Embora na maioria dos casos os lingotes para reposição do nível do banho metálico sejam inseridos diretamente no pote principal, alguns tipos de revestimento requerem que a fusão dos lingotes ocorra fora do pote principal, tornando-se necessário o uso de um pote auxiliar.

É o que ocorre na produção de aços com um revestimento específico denominado Galvalume®, cujo pote auxiliar é um forno de indução *coreless*. Este forno, comumente denominado Premelt, é de pequena capacidade (10 toneladas), tendo a função de fundir os lingotes e manter o banho na temperatura de trabalho (650°C). Quando ocorre a produção de material com revestimento Galvalume®, este pote auxiliar comunica-se com o pote principal através de uma calha refratária, por onde flui a liga de revestimento à base de Alumínio e Zinco, abastecendo o pote principal.

A Figura 2.5 mostra como o pote principal (forno a canal) e auxiliar (forno *coreless*) são interligados na produção de Galvalume®.

Figura 2.5 – Abastecimento do Pote Principal pelo Pote Auxiliar



Fonte: ArcelorMittal Vega (2019).

O Pote auxiliar (forno *coreless*) mostrado na Figura 2.5 é o objeto de estudo deste trabalho, o que será detalhada nas seções seguintes.

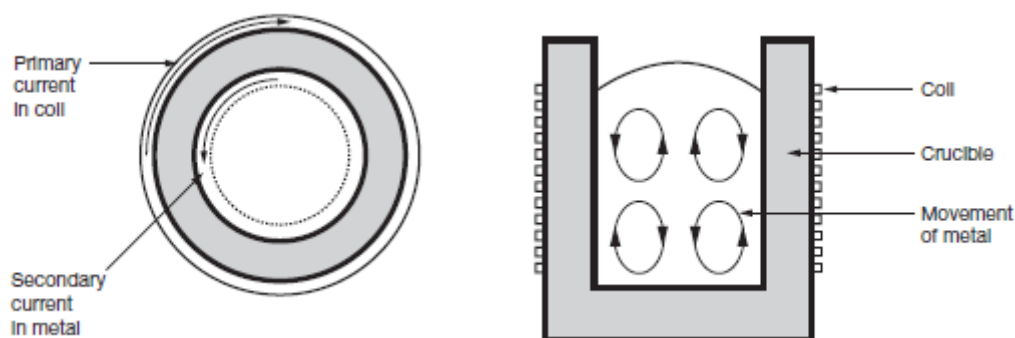
### 2.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE FORNOS DE INDUÇÃO

O forno de indução é um tipo de forno que usa correntes elétricas e seus efeitos para fundir metais e mantê-los em estado líquido. O princípio de operação é semelhante ao de um transformador elétrico, no qual uma bobina de indução funciona como bobina primária de múltiplas espiras e o banho metálico funciona como uma bobina secundária de uma única espira. Quando uma corrente alternada é aplicada na bobina de indução primária, uma corrente significativamente maior é induzida no banho metálico. Na Figura 2.6, observa-se que estas correntes têm sentidos opostos.

A resistência que o banho metálico oferece à passagem desta corrente induzida faz com que ele aqueça. Portanto, o aquecimento por indução é simplesmente um método de transferência de energia térmica, governado basicamente pelo fenômeno da indução eletromagnética e pelo efeito joule.

Outro efeito do campo magnético no banho metálico é o surgimento de um movimento de agitação induzido (*inductive stirring action*), conforme pode ser visto na Figura 2.6, o qual é responsável pela homogeneização da composição do banho, mas também poderá ser causa de desgaste do refratário, como será visto na seção 2.6.

Figura 2.6 – Sentido das Correntes Elétricas e Movimento de Agitação Induzido



Fonte: *Good Practice Guide 50: Efficient melting in coreless induction furnaces* (2000).

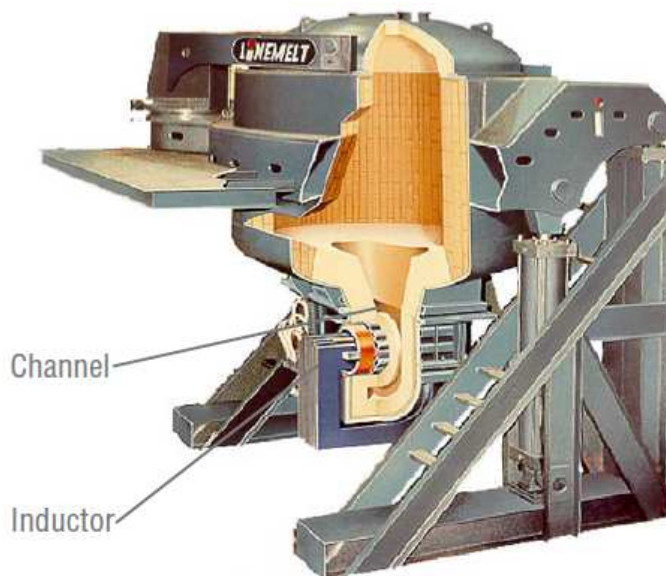
Atualmente, predominam duas formas construtivas de fornos de indução: forno a canal e forno *coreless*. Para uma melhor compreensão do princípio de funcionamento destes fornos, serão utilizados seus modelos básicos, os quais são detalhados a seguir.

### 2.3.1 Forno de Indução a Canal

Este tipo de forno consiste em uma estrutura metálica cujo interior é revestido por diferentes camadas de materiais refratários, sendo que a camada mais interna fica em contato direto com a carga metálica.

O forno é composto basicamente de duas partes: uma estrutura superior principal, que armazena a carga metálica e uma parte inferior, de menor volume, onde fica armazenado um indutor em torno do qual é construído um canal refratário por onde flui o metal que é aquecido a alta temperatura. A Figura 2.7 mostra como o forno a canal é construído.

Figura 2.7 – Forma Construtiva de um Forno de Indução a Canal



Fonte: *Inductotherm Guide for Induction Furnaces* (2008).

Em um forno a canal, todo o aquecimento é concentrado no próprio canal, que passa por entre um núcleo de aço-silício laminado e em volta de uma bobina, que será a fonte primária do circuito elétrico.

Este circuito elétrico formado pela bobina e pelo núcleo é completado quando o canal é preenchido com o metal derretido. Todo este conjunto denomina-se indutor.

Uma vez que o canal é preenchido com metal derretido, a bobina do forno pode ser energizada com uma corrente alternada, o que produz um intenso campo eletromagnético que induz corrente elétrica no metal derretido circulante, que é aquecido pelo efeito Joule destas correntes induzidas.

O metal aquecido sai do canal e conseqüentemente, aquece todo o banho, num fluxo contínuo de metal mais frio entrando de um lado do canal e metal aquecido saindo no lado oposto do canal.

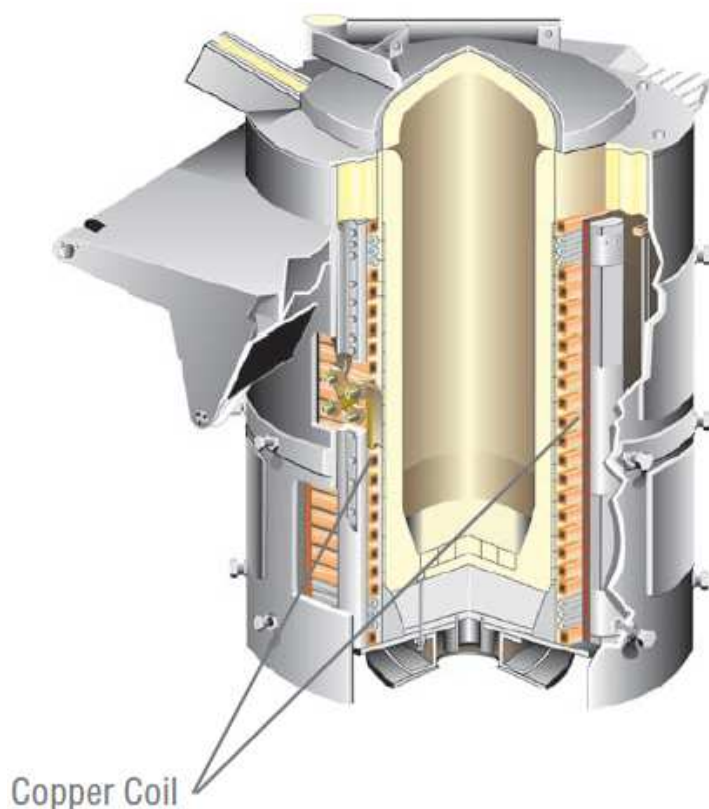
### 2.3.2 Forno de Indução *Coreless*

Este forno é assim denominado justamente porque, ao contrário do forno a canal, o forno *coreless* não possui um indutor com núcleo. Ao invés de um indutor localizado na lateral ou parte inferior do forno, este forno possui uma extensa bobina de cobre que o circunda, isolada do banho metálico por camadas de material refratário. Desta forma, todo o banho depositado no forno estará sujeito aos efeitos de

indução, e não apenas uma parcela do metal derretido, como no forno a canal. As características construtivas deste forno podem ser vistas na Figura 2.8.

Quanto ao princípio de funcionamento, este se assemelha ao forno a canal: fazendo circular uma elevada corrente elétrica alternada através da bobina, cria-se um campo magnético que penetra o refratário e rapidamente aquece o metal contido no interior do forno até o seu respectivo ponto de fusão.

Figura 2.8 – Forma Construtiva de um Forno de Indução *Coreless*



Fonte: Inductotherm Corp. (2008).

Para que a bobina não seja fundida neste processo, água de refrigeração flui no interior dos tubos de cobre da bobina.

Sua capacidade pode variar desde algumas até centenas de toneladas.

#### 2.4 CARACTERÍSTICAS DO FORNO CORELESS DA LINHA DE GALVANIZAÇÃO Nº2 DA ARCELORMITTAL VEGA

Conforme descrito na seção 2.2, a ArcelorMittal Vega dispõe de um forno de indução *coreless*, o qual é utilizado como pote auxiliar para fazer a fusão dos lingotes do revestimento Galvalume®. Este forno permite a fusão de 3 t/h de Alumínio-Zinco,

fundidos a uma temperatura de 650 °C e tem capacidade para 10 toneladas de metal líquido.

Sua bobina primária tem as seguintes características nominais:

- Potência nominal: 1250 kW
- Corrente nominal: 7500 A

Esta bobina é alimentada por um painel inversor de frequência, o qual apresenta as seguintes características elétricas, em valores nominais:

- Alimentação de Entrada: 575 V CA – 60 Hz – 1360 kVA
- Alimentação de Saída: 1250 kW – 2620 V CA – 7500 A – 180 Hz

Quanto às características físicas, o forno tem as seguintes dimensões aproximadas:

- Altura externa: 2400 mm
- Altura da cuba: 1700 mm
- Diâmetro externo: 2440 mm
- Diâmetro médio da cuba: 1580 mm

Quanto à espessura do revestimento refratário, objeto de análise deste presente trabalho, esta varia entre 120 a 240 mm desde a borda até base do forno.

Como será visto na seção 2.5, ao longo do tempo esta camada refratária apresenta diversas alterações, tais como erosão ou a incrustação e depósito de partículas oriundas de impurezas e reações químicas do banho, que alteram a eficiência do forno, podendo inclusive torná-lo inoperante.

## 2.5 ALTERAÇÕES NO REVESTIMENTO REFRAATÁRIO E SUAS CONSEQUÊNCIAS PARA A CONFIABILIDADE DO FORNO

Em todo forno de indução *coreless*, há uma espessura ideal para a parede refratária, cuidadosamente calculada pelo fabricante do forno para atingir o desempenho ótimo de fusão. Estes cálculos envolvem considerações de segurança, características elétricas da bobina, resistência metálica e condutividade elétrica da carga, considerações relativas à estrutura do forno e dos materiais refratários, restrições operacionais e necessidades de produção.

Um revestimento refratário relativamente fino proporciona um bom acoplamento elétrico da bobina com a carga metálica do banho, resultando em alta eficiência. Já um revestimento mais espesso reduz a transmissão de calor do banho

para a bobina e para a carcaça do forno, o que reduz a perda de energia por radiação, perdas estas calculadas entre 20 a 35% da energia total de entrada no forno. Portanto, os fabricantes dos fornos devem especificar uma espessura ideal de revestimento que estabeleça um compromisso entre estas duas características, ambas desejáveis, garantindo ao forno uma boa relação de utilização de potência e uma capacidade de fusão otimizada, com as menores perdas possíveis de energia.

Mas à medida que o forno vai sendo utilizado, esta espessura ideal da parede refratária será afetada basicamente de três formas:

- Pela erosão (desgaste) do revestimento refratário;
- Pela infiltração de metal líquido no revestimento refratário;
- Pela deposição de materiais óxidos resistentes na superfície do revestimento refratário.

## 2.6 MOVIMENTO DE AGITAÇÃO INDUZIDO DO BANHO E SEUS EFEITOS NO DESGASTE DO REVESTIMENTO REFRACTÁRIO

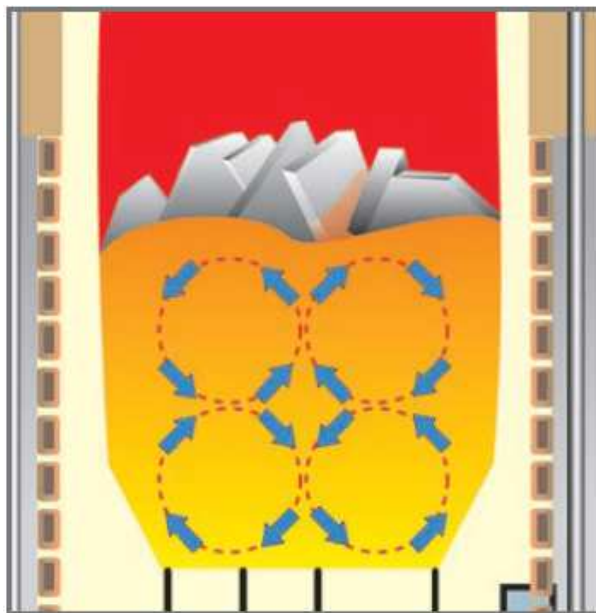
Um dos efeitos do campo eletromagnético no banho metálico é o surgimento de um movimento de agitação induzido (*inductive stirring action*), o qual é responsável pela homogeneização da composição do banho e por fazer circular o metal em alta temperatura, afastando-o das paredes do forno, evitando o sobreaquecimento da superfície refratária.

Entretanto, como efeito colateral, este movimento é o maior causador de desgaste do revestimento refratário através da ação do metal em movimento nas paredes do forno.

O campo eletromagnético agindo sobre o banho de metal líquido faz com este se movimente em um padrão de “duplo oito”, conforme ilustrado na Figura 2.9.



Figura 2.9 – Movimento de Agitação Induzido



Fonte: *Inductotherm Guide for Induction Furnaces* (2008).

A intensidade de agitação é determinada pelo tamanho do forno, pela potência transferida para o banho, pela frequência do campo eletromagnético e pelo tipo e quantidade de metal no forno.

Como já visto na seção 2.5, este desgaste irá influenciar o desempenho do forno de indução, melhorando a sua eficiência através da melhora do acoplamento da bobina com a carga, mas ao mesmo tempo aumentando as perdas de energia e os riscos de contato do metal líquido com a bobina.

Deve-se, portanto, assegurar que o revestimento do forno permaneça dentro dos limites especificados pelo fabricante. Uma vez atingida a espessura mínima, o revestimento refratário deve ser substituído imediatamente para evitar falhas e graves acidentes.

Mas o movimento padrão de agitação induzida não causa apenas desgaste do refratário, pois ele é também responsável pelo surgimento de três camadas localizadas de deposição de materiais óxidos resistentes ao longo da superfície do revestimento refratário: na linha de superfície da escória (*slag line*), na região central da parede entre os dois padrões de fluxos induzidos e na base do forno.

A formação de depósitos, como será visto na seção 2.7, assim como o desgaste, também é extremamente prejudicial para o revestimento refratário, pois ambos contribuem para a infiltração de metal líquido na parede refratária, tornando o forno inoperante.

## 2.7 O PROCESSO DE FORMAÇÃO DE BUILDUP E SEUS EFEITOS NO REVESTIMENTO REFRAATÁRIO

*Buildup* (ou acúmulo) consiste na deposição de partículas de óxidos suspensas no banho na parede refratária do forno.

A fonte principal de *buildup* são as partículas de óxido, tanto as formadas no banho como as liberadas pelos materiais que compõem a carga durante o processo de fusão, que são pequenas demais para ficarem suspensas e circular com o fluxo induzido.

Quando uma partícula de óxido faz contatos com a parede refratária, ela adere e sinteriza no local. Uma vez que um revestimento de óxido é formado no refratário, mais deposição ocorrerá facilmente, construindo assim uma camada de partículas.

Se não for impedido de se formar ou se não for removido ainda no início, o acúmulo de *buildup* diminuirá o volume efetivo interno do forno, reduzindo sua capacidade e eficiência global. O resultado é a redução do percentual de utilização da potência e o conseqüente aumento do consumo de energia.

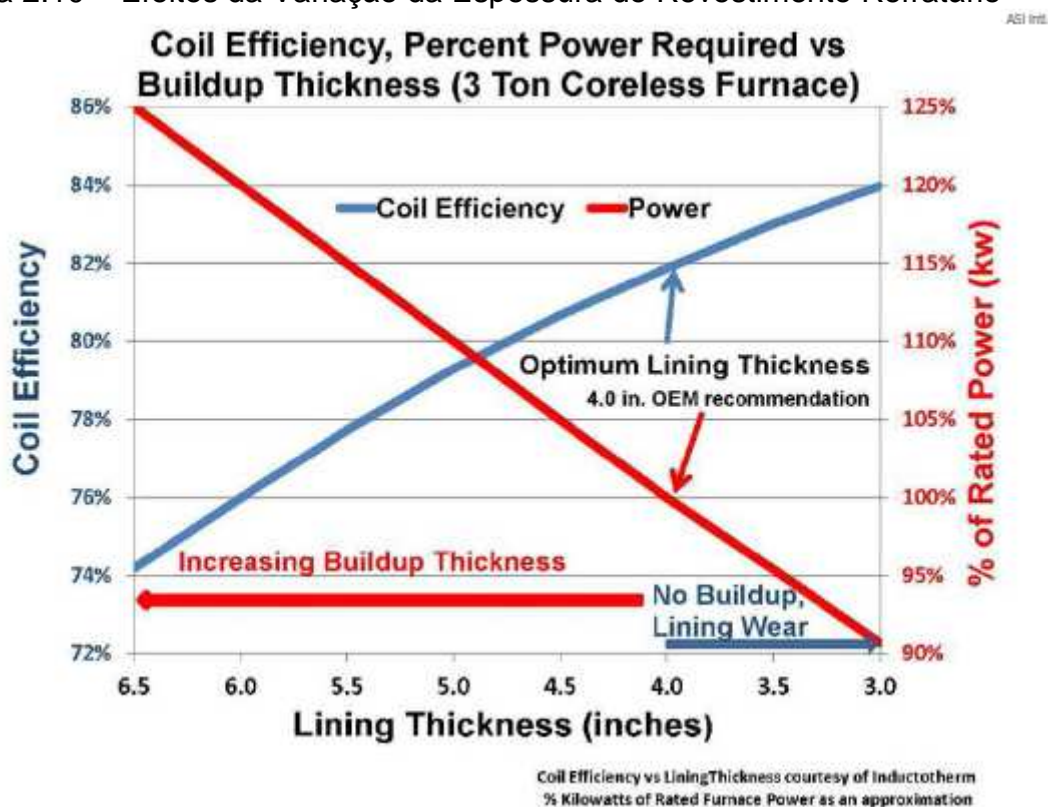
A Figura 2.10 mostra como a eficiência da bobina e o percentual de utilização de potência variam com a espessura da parede do revestimento refratário em um forno *coreless* de 3 toneladas de capacidade, tanto em função do desgaste do revestimento como também da formação de *buildup*. (NARO et al, 2019).

Observa-se na Figura 2.10 que a formação de *buildup* não só aumentará a espessura efetiva da parede refratária, como também diminuirá a eficiência da bobina. À medida que a espessura efetiva do refratário aumenta devido à formação de *buildup*, a eficiência da bobina diminui e a quantidade de energia elétrica necessária para fundir a carga metálica aumenta (mostrado como um percentual aproximado da potência nominal). Uma maior quantidade de energia elétrica implica necessariamente numa corrente elétrica mais elevada na bobina.

A eficiência da bobina na espessura ideal de revestimento para o forno de 3 toneladas analisado (4 polegadas ou 101,6 mm) é de 82% e o percentual de potência nominal em quilowatts (kW) é 100%.

À medida que a espessura da deposição de *buildup* se aproxima de 2,5 polegadas (63,5 mm), estima-se que um aumento adicional de 25% em kW será necessário para realizar a fusão da carga metálica.

Figura 2.10 – Efeitos da Variação da Espessura do Revestimento Refratário



Fonte: Foundry Management and Technology (2019)

Um revestimento refratário efetivo mais espesso significa que o banho metálico está ainda mais longe da bobina, ou seja, diminui-se o acoplamento entre a bobina e a carga metálica. Isso resulta em um menor fator de potência e menor eficiência da bobina. Uma corrente elétrica maior circulando na bobina, resulta em maiores perdas elétricas.

A formação de *buildup* insolúvel que adere ao revestimento refratário ou se acumula na base do forno tem o mesmo efeito que aumentar a espessura do refratário. Uma vez que isso resulta em mais perdas elétricas na bobina, há menos energia disponível para o forno, aumentando o tempo necessário para fusão, as perdas de calor por condução e radiação e o consumo de energia.

Por outro lado, uma redução da espessura da parede refratária por desgaste melhora a eficiência da bobina e aumenta relação de potência aplicada. Estudos mostram que ocorre uma redução substancial no consumo de energia devido à redução da espessura do revestimento refratário. Alguns destes estudos citam o exemplo de um forno *coreless* de 3 toneladas, cujo consumo de energia reduziu de

9% três semanas após o refratário ter sido instalado, devido ao desgaste do revestimento refratário<sup>1</sup>.

Visto que alterações na espessura do revestimento refratário implicam diretamente em variações na potência efetiva da bobina primária e dado que esta potência é diretamente proporcional à corrente elétrica que circula na bobina, os capítulos seguintes buscarão estabelecer uma análise de degradação que permita inferir, a partir do comportamento desta corrente, as condições do revestimento refratário do forno.

1. "*Efficient melting in coreless induction furnaces*," *GOOD PRACTICE GUIDE* No. 50, ETSU, Harwell, Didcot, Oxfordshire, 2000.

## 2.8 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o processo de galvanização por imersão a quente, buscando apresentar de forma detalhada os fornos de indução, equipamentos essenciais a este processo produtivo. Foram apresentadas as características dos fornos a canal e *coreless*, com foco neste último, por ser o objeto de análise deste trabalho.

Foi também apresentada a problemática relacionada às alterações no revestimento refratário dos fornos *coreless* e suas consequências para a confiabilidade do forno.

A partir da bibliografia disponibilizada pelos fabricantes de fornos e de refratários, foi possível estabelecer uma relação entre estas alterações na espessura do revestimento e a corrente da bobina primária, podendo esta servir como um forte indicador da condição do revestimento refratário, alterado ao longo do tempo tanto por erosão como por deposição de *buildup*.

No capítulo seguinte, buscar-se-á apresentar as principais teorias relacionadas à Engenharia de Confiabilidade que podem ser aplicadas neste estudo, com foco na análise de degradação e como a mesma pode ser aplicada para determinar a confiabilidade da instalação.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os fundamentos teóricos da engenharia de confiabilidade, quando serão explanadas as ferramentas de confiabilidade necessárias ao desenvolvimento do estudo de caso do Capítulo 4. Este embasamento teórico inclui os conceitos fundamentais de confiabilidade, com ênfase na Análise de Dados de Vida (LDA), em particular nos métodos de Análise de Degradação.

#### 3.1 HISTÓRICO E CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE CONFIABILIDADE

Com o surgimento de novas tecnologias no século XX, sobretudo após as duas grandes guerras mundiais, quando os esforços de guerra levaram a um grande desenvolvimento e aperfeiçoamento de tecnologias militares, a confiabilidade se sedimentou como um fator indissociável do desenvolvimento tecnológico.

Em 1952, o Departamento de Defesa Americano criou o Grupo Consultivo em Confiabilidade de Equipamentos Eletrônicos (*Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment* - AGREE). Nas décadas seguintes, a confiabilidade seguiu seu desenvolvimento, sobretudo pelo impulso dado pelas empresas do setor aeronáutico e nuclear, setores que intrinsecamente demandam um elevado nível de segurança.

Atualmente, os conceitos ligados à confiabilidade foram expandidos e abarcados por diversos outros setores tecnológicos e industriais, dentre os quais a Manutenção Industrial, no qual este trabalho se insere. (MARIANO; RIGONI, 2018).

Conforme definição da ABNT NBR 5462, o termo “confiabilidade” é usado como uma medida de desempenho de confiabilidade, sendo esta conceituada como “a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.” (ABNT NBR 5462, 1994).

O estudo da confiabilidade quantitativa envolve métricas importantes, as quais permitem fazer previsões sobre a vida de todos os produtos a partir dos dados de vida (tempo até falha) de uma amostra representativa do produto.

As principais métricas de confiabilidade são (Reliawiki, 2011a):

- **Confiabilidade,  $R(t)$ :** Probabilidade de um item funcionar até um dado intervalo de tempo “ $t$ ”, dentro da mesma condição operacional analisada. Por exemplo, a confiabilidade de um determinado produto

pode ser de 88% após 3 anos de operação, que é a chance deste produto operar com sucesso neste período.

- **Probabilidade de Falha,  $F(t)$ :** Probabilidade de um item falhar até o tempo “ $t$ ” observado e dentro da mesma condição operacional analisada. Probabilidade de falha também é conhecida como não-confiabilidade, sendo a recíproca da confiabilidade. Por exemplo, se a confiabilidade de um produto após 3 anos de operação é 88%, sua probabilidade de falha é de 12% neste mesmo período.
- **Vida  $BX(\%)$ :** É o tempo estimado em que a probabilidade de falha alcance um valor especificado ( $X\%$ ). Por exemplo, se espera-se que 10% de um dado produto falhe em 4 anos, sua vida  $B(10)$  é 4 anos.
- **Vida Média:** É o tempo médio que os itens de uma população são esperados de funcionarem antes de uma falha ocorrer. Esta métrica é frequentemente referida como MTTF (*Mean Time To Failure*) ou MTBF (*Mean Time Before Failure*).
- **Vida Mediana:** É o tempo em que se espera que 50% das falhas ocorram.
- **Confiabilidade Condicional  $R(t|T)$ :** Probabilidade de funcionar até um tempo adicional “ $t$ ”, dado que o item já funcionou, com sucesso, durante um intervalo de tempo “ $T$ ”.
- **Taxa de Falha  $\lambda(t)$ :** É o risco de um determinado item falhar em um intervalo de tempo infinitamente curto (quase zero) dado que este mesmo item não falhou até então. Expressa o número de falhas por unidade de tempo que pode ser esperada de ocorrer com um determinado produto.

Para se obter tais métricas, faz-se necessário coletar os dados de vida (tempo até falha) de uma amostra representativa de um determinado item ou produto. A seguir, seleciona-se uma distribuição de vida que melhor se adeque ao conjunto de dados de vida coletados e estima-se os parâmetros que fazem a adequação da distribuição aos dados, o que permitirá modelar a vida do produto com um todo. (Reliawiki, 2011b).

A distribuição parametrizada para o conjunto de dados pode então ser usada para a obtenção das métricas descritas acima, sendo estas obtidas, na maioria dos casos, via *software* devido à alta complexidade matemática na análise.

### 3.2 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

Este tema se refere ao estudo e modelamento da vida de produtos ou equipamentos observados. No caso de equipamentos, trata-se do tempo que este opera antes de entrar em falha. Estes tempos de vida podem ser medidos em horas, dias, quilômetros, ciclos ou qualquer outra unidade com a qual a vida do produto ou equipamento possa ser medida. A análise posterior destes dados e a estimativa de vida são conhecidas como análise de dados de vida ou LDA (*Life Data Analysis*). (Reliawiki, 2011a).

A análise de dados de vida consiste, portanto, em tratar as informações de vida observada através do modelamento de uma distribuição estatística que melhor se ajusta a uma amostra representativa dos dados de vida. A distribuição parametrizada para os dados pode então ser usada cálculo das métricas de confiabilidade.

A análise de dados de vida requer:

- Obtenção dos dados de vida do produto;
- Seleção de uma distribuição estatística que corresponda aos dados e modele a vida do produto;
- Estimativa de parâmetros que ajustem a distribuição aos dados;
- Geração de gráficos e resultados que estimem a vida característica do produto, como a confiabilidade ou a vida média.

#### 3.2.1 Classificação dos Dados de Vida

Modelos estatísticos dependem amplamente de dados para fazer previsões. Em análise de dados de vida, os modelos são distribuições estatísticas e os dados são dados de vida ou dados de tempo até a falha do produto. A precisão de qualquer estimativa é diretamente proporcional à qualidade, precisão e integridade dos dados fornecidos. Bons dados, juntamente com a escolha de um modelo apropriado,



geralmente resultam em boas estimativas. Dados insuficientes ou ruins irão quase sempre gerar estimativas não adequadas.

Em análise de dados de vida, pretende-se utilizar todos os dados disponíveis, os quais algumas vezes são completos ou incluem incertezas de quando a falha ocorreu.

Dados de vida podem, portanto, ser classificados em dois tipos:

- Dados completos (todas informações disponíveis)
- Dados censurados (algumas informações estão ausentes).

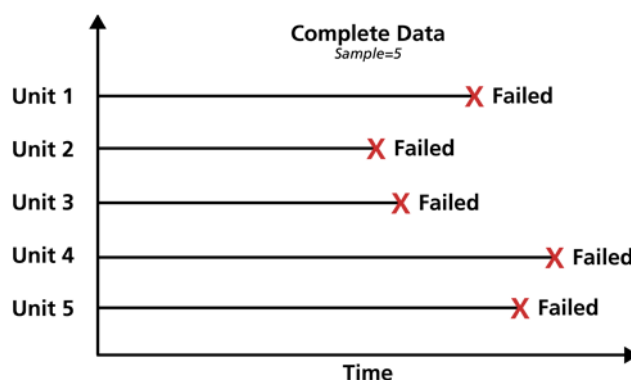
Estes tipos são explicados a seguir. (Reliawiki, 2011e).

### 3.2.1.1 Dados Completos

Dados completos significam que o valor de cada unidade da amostra é observado ou conhecido. No caso de análise de dados de vida, um conjunto de dados completos é composto pelos tempos até falha de todas as unidades desta amostra.

A Figura 3.1 mostra um teste onde todos os dados são dados completos.

Figura 3.1 – Dados Completos



Fonte: Reliawiki (2011e).

Observa-se que foram testadas cinco unidades até todas falharem e os seus respectivos tempos até a falha são conhecidos e foram registrados. Este é então um conjunto de dados completos, pois se conhece o tempo até falha de todas as unidades.

### 3.2.1.2 Dados Censurados

Em muitos casos, porém, nem todas as unidades na mesma amostra podem ter falhado (o evento de interesse não foi observado) ou os tempos exatos até a falha de todas as unidades não são conhecidos. Estes tipos de dados são comumente chamados de dados censurados.

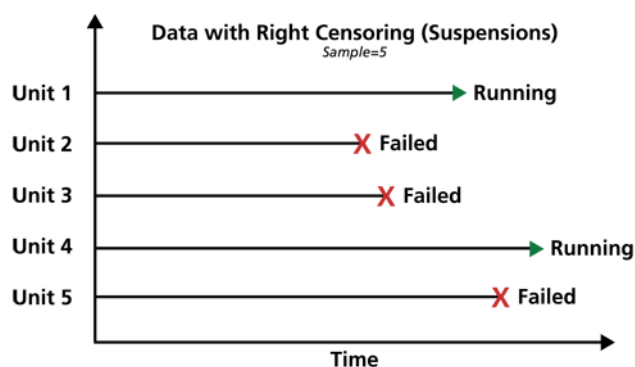
Existem três tipos de censura:

- Censura à direita (também conhecida como suspensão)
- Censura no intervalo
- Censura à esquerda

#### 3.2.1.2.1 Dados Censurados à Direita (Suspensão)

O caso mais comum de censura se refere aos dados censurados à direita, ou dados suspensos. No caso dos dados de vida, estes conjuntos de dados são compostos de unidades que ainda não falharam. Por exemplo, se foram testadas cinco unidades e somente três falharam ao final do teste, as duas unidades que não falharam seriam dados censurados à direita (ou dados suspensos). O termo censura à direita significa que o evento de interesse (o tempo até falha) está à direita do instante de observação dos dados. Assim, nas duas unidades que se mantêm em operação, uma eventual falha poderá ocorrer algum tempo após o instante de observação dos dados (ou à direita na escala do tempo).

Figura 3.2 – Dados de Censura à Direita



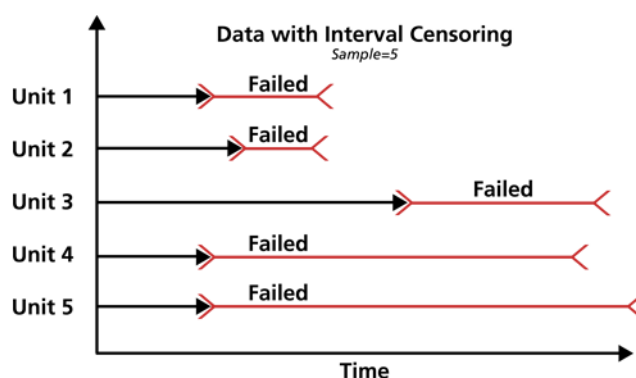
Fonte: Reliawiki (2011e).

No exemplo mostrado na Figura 3.2 é possível observar que as unidades 2, 3 e 5 se referem a dados completos, pois é conhecido o tempo no qual apresentaram falha. As unidades 1 e 4 são dados censurados à direita, pois no tempo da observação, estas continuam em funcionamento e sua falha ocorrerá à direita deste tempo.

### 3.2.1.2.2 Dados Censurados em Intervalo

O segundo tipo de censura é comumente chamado de dados censurados em intervalo, pois refletem a incerteza nos tempos exatos que as unidades falharam dentro de um intervalo. Este tipo de dado frequentemente vem de testes ou situações onde os objetos de interesse não são constantemente monitorados. Por exemplo, ao realizar um teste em cinco unidades e inspecioná-las a cada 100 horas, somente se sabe se a unidade falhou ou não entre as inspeções. Se ao inspecionar certa unidade em teste após 100 h e encontrá-la operando, e então realizar outra inspeção após 200 horas e encontrá-la em falha, então a única informação que se tem é que a unidade falhou em algum tempo no intervalo entre 100 e 200 horas. Dados censurados são também chamados de dados de inspeção por alguns autores.

Figura 3.3 – Dados Censurados em Intervalo



Fonte: Reliawiki (2011e).

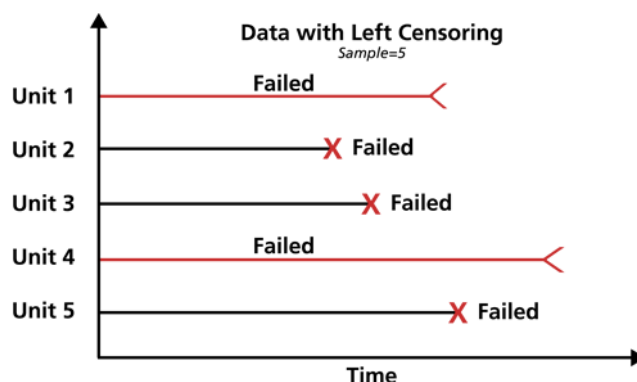
Recomenda-se evitar dados censurados em intervalo, pois eles são menos informativos comparados aos dados completos. Entretanto, existem casos em que dados censurados em intervalos são inevitáveis devido à natureza do teste ou do produto ou equipamento observado. Nestes casos, deve-se reduzir os intervalos de inspeção. Se o intervalo de inspeção é muito longo, todas as unidades no teste

poderão falhar dentro deste intervalo e, assim, nenhuma distribuição de falhas poderá ser obtida.

### 3.2.1.2.3 Dados Censurados à Esquerda

O terceiro tipo de censura é similar à censura de intervalo e é chamado de dados censurados à esquerda. Nos dados censurados à esquerda, o que se sabe é que o tempo da falha ocorreu antes de um tempo específico de observação. Por exemplo, sabe-se que determinada unidade falhou algum tempo antes de 100 horas, mas não se sabe exatamente quando. Em outras palavras, a falha pode ter ocorrido num tempo entre 0 e 100 horas. Isto é idêntico aos dados censurados em intervalo, nos casos em que o tempo de início para o intervalo é zero.

Figura 3.4 – Dados Censurados à Esquerda



Fonte: Reliawiki (2011e).

Na Figura 3.4, para as unidades 2, 3 e 5, sabe-se o momento de ocorrência da falha, portanto, são dados completos. Nas unidades 1 e 4, o que se sabe é que a falha ocorreu antes do período de observação, porém não se sabe o momento exato de sua ocorrência, ou seja, trata-se de dados censurados à esquerda.

## 3.3 MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE DADOS DE VIDA

Distribuições de vida é o nome dado a um conjunto de distribuições estatísticas de probabilidade usadas na Engenharia de Confiabilidade e na análise de dados de vida. Estas distribuições foram formuladas por estatísticos, matemáticos, e

engenheiros para modelar matematicamente ou representar um determinado comportamento. (Reliawiki, 2011c).

Uma distribuição estatística é completamente descrita pela sua função Densidade de Probabilidade de Falha ou *pdf* (*Probability Density Function*), da qual são derivadas outras funções comumente usadas na Engenharia de Confiabilidade e na análise de dados de vida, tais como a função Densidade Acumulada de Falhas ou *cdf*, a função Confiabilidade  $R(t)$  e a função Taxa de Falha  $\lambda(t)$ .

Existem diversos modelos de distribuição, tais como distribuição Normal, Exponencial, Weibull, Lognormal, Gama Generalizada e cada uma delas tem uma forma pré-definida da sua respectiva função *pdf* ou  $f(t)$ .

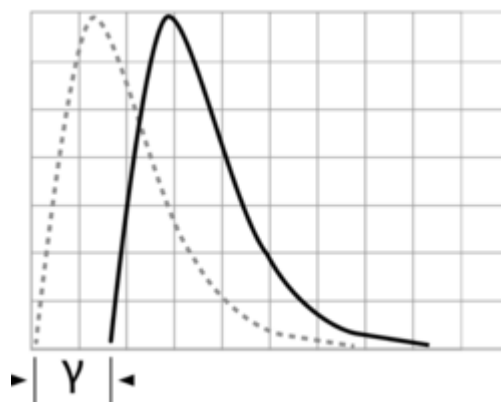
Algumas distribuições tendem a representar melhor os dados de vida, sendo comumente chamadas “distribuições de vida”. Para que estas distribuições se ajustem melhor a um determinado conjunto de dados de vida, cada função que representa a distribuição requer parâmetros específicos, os quais são estimados para um determinado conjunto de dados de vida.

As distribuições podem ter qualquer quantidade de parâmetros, mas quanto maior esta quantidade, maior a quantidade de dados requerida para um ajuste adequado. Em geral, as distribuições de vida são limitadas a três parâmetros, vistos a seguir:

- **Parâmetro de Escala:** é o tipo mais comum de parâmetro. Todas as principais distribuições têm um parâmetro de escala. No caso de distribuições monoparamétricas, o parâmetro de escala é único parâmetro. Este define onde a maior parte da distribuição falha ou quão alongada é a distribuição. No caso da distribuição Normal, por exemplo, o parâmetro da escala é o desvio padrão.
- **Parâmetro de Forma:** este parâmetro ajuda a definir a forma da distribuição. Algumas distribuições, como a distribuição Exponencial e a Normal, não possuem um parâmetro de forma, uma vez que elas têm uma forma pré-definida que não muda. No caso da distribuição Normal, a forma é conhecida “curva do sino”. O efeito do parâmetro de forma em uma distribuição é refletido na forma da função *pdf*, na função de Confiabilidade  $R(t)$  e na função de Taxa de Falha  $\lambda(t)$ .

- **Parâmetro de Localização:** este parâmetro é usado para deslocar a distribuição em uma ou outra direção. Ele define a localização da origem da distribuição e pode ser tanto positivo como negativo. Em termos de distribuições de vida, o parâmetro de localização representa um deslocamento no tempo, como mostra a Figura 3.5.

Figura 3.5 – Representação Gráfica do Parâmetro de Localização



Fonte: Reliawiki (2011c).

Uma vez conhecidos os principais parâmetros utilizados na definição da função de uma distribuição de vida, os principais tipos de distribuição serão explanados a seguir.

### 3.3.1 Distribuição Exponencial

A distribuição Exponencial é comumente usada para componentes ou sistemas em que a taxa de falha é constante. Devido à sua simplicidade, ela é largamente empregada, até mesmo em casos em que não seria a mais adequada.

Uma distribuição Exponencial pode ser bi ou monoparamétrica.

A *pdf* da distribuição Exponencial Biparamétrica é matematicamente definida por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)} \quad (3.1)$$

onde:

- $t$  é a variável aleatória tempo

- $\lambda$  (lambda) é a constante Taxa de Falha, dada em falhas por hora, falhas por ciclo, etc.
- $\gamma$  (gama) é parâmetro de localização.

Se o parâmetro de localização é assumido como zero, a distribuição Exponencial torna-se monoparamétrica.

A *pdf* da distribuição Exponencial Monoparamétrica é matematicamente definida por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3.2)$$

A função Confiabilidade  $R(t)$  pode ser derivada da *pdf* e é dada por:

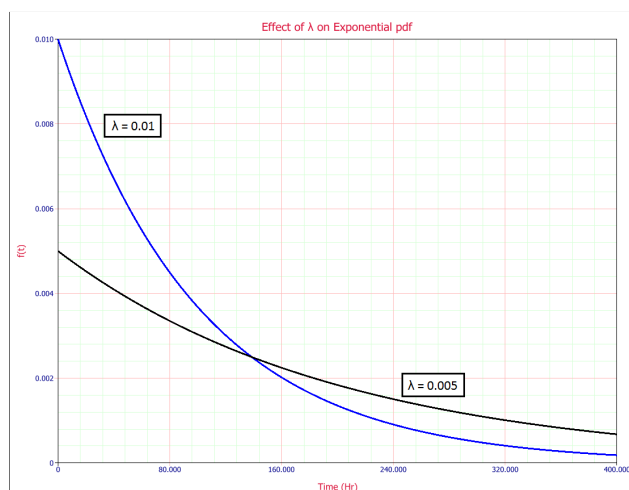
$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.3)$$

A função Taxa de Falha, que é constante para a distribuição Exponencial, é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda \quad (3.4)$$

A função Densidade de Probabilidade de Falha (*pdf*) da distribuição Exponencial é representada na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Função *pdf* da Distribuição Exponencial



Observa-se na Figura 3.6 que a função *pdf* Exponencial é sempre convexa e alonga-se para a direita à medida que o valor de  $\lambda$  diminui.

### 3.3.2 Distribuição Weibull

A distribuição Weibull (Reliawiki, 2011d) é largamente utilizada em confiabilidade e nas análises de dados de vida devido à sua versatilidade. Pode ser usada para modelar a resistência de materiais, os tempos até falha ou TTF (*Times-To-Failure*) de componentes, equipamentos ou sistemas eletrônicos ou mecânicos. Sua versatilidade é devida a ela poder assumir as características de outros tipos de distribuições, de acordo com o valor estimado para o parâmetro de forma  $\beta$ .

A distribuição Weibull pode ser tri, bi ou monoparamétrica, conforme o número de parâmetros da equação.

A função *pdf* da distribuição Weibull Triparamétrica é definida por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (3.5)$$

onde:

- $\eta$  (eta) é o parâmetro de escala ou vida característica, que define onde a maior parte da distribuição falha. Possui a mesma unidade de  $t$  (horas, milhas, ciclos, atuações, etc.).
- $\beta$  (beta) é o parâmetro de forma ou inclinação, que define a forma da distribuição, sendo um número adimensional;
- $\gamma$  (gama) é o parâmetro de localização ou vida livre de falha, que define a localização da distribuição no tempo, ou seja, representa um deslocamento no eixo da abscissa  $t$ , transladando o início da distribuição para um valor diferente de zero. Assim como  $\eta$ ,  $\gamma$  também possui a mesma unidade de  $t$ .

Se  $\gamma = 0$ , então a distribuição Weibull se torna biparamétrica, cuja *pdf* é definida por:



$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.6)$$

Esta é a forma mais popular e mais simples da distribuição Weibull, sendo, portanto, a mais utilizada na Engenharia de Confiabilidade.

Uma forma adicional é a distribuição Weibull monoparamétrica, na qual se assume que  $\gamma = 0$  e o parâmetro de forma  $\beta$  é assumido como uma constante conhecida  $C$ . Sua função *pdf* é definida por:

$$f(t) = \frac{C}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{C-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^C} \quad (3.7)$$

### 3.3.2.1 Distribuição Weibull Biparamétrica

Por ser amplamente utilizada, serão representados abaixo as funções e os gráficos da distribuição Weibull biparamétrica.

A função Densidade Acumulada de Falha (CDF), também chamada de “não-confiabilidade” é dada por:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.8)$$

A função Confiabilidade é dada por:

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - F(t) \\ R(t) &= e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \end{aligned} \quad (3.9)$$

A Taxa de Falha é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3.10)$$

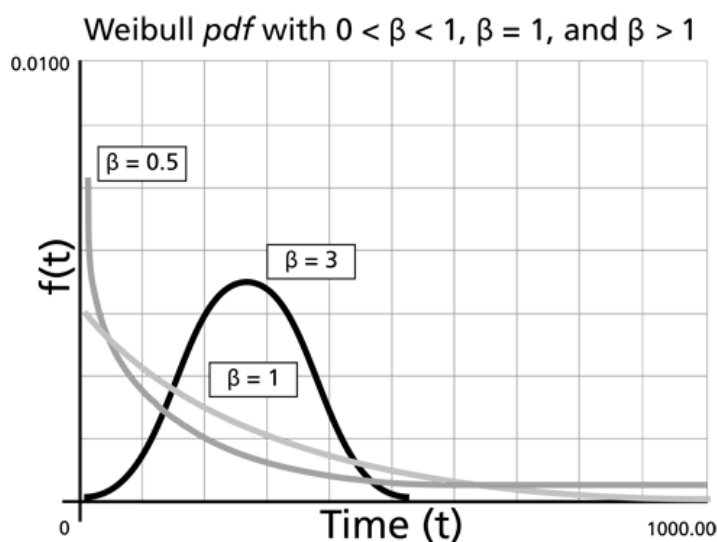
### 3.3.2.2 Características da Distribuição Weibull

Características como a forma de curva, a confiabilidade e a taxa de falha podem ser afetadas pelos valores dos parâmetros de forma ( $\beta$ ) e de escala ( $\eta$ ).

#### 3.3.2.2.1 Efeitos do Parâmetro de Forma $\beta$

O parâmetro de forma  $\beta$  é também chamado de inclinação, devido o valor de  $\beta$  ser a inclinação da reta no método de estimativa de parâmetros Plotagem de Probabilidades. Diferentes valores de  $\beta$  podem ter efeitos significantes no comportamento da distribuição. A Figura 3.7 mostra estes diferentes efeitos na forma da função *pdf*.

Figura 3.7 – Funções *pdf* da Distribuição Weibull para Diferentes Valores de  $\beta$



Fonte: Reliawiki (2011d).

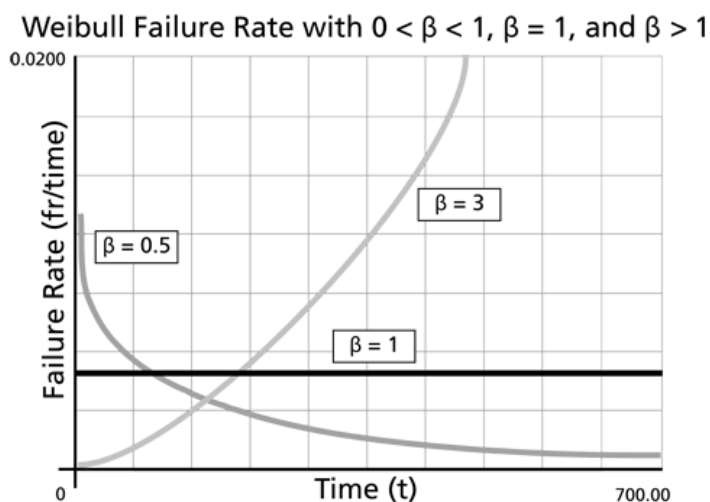
Observa-se que diferentes valores de  $\beta$  faz com que a equação da distribuição de reduza àquela de outros modelos de distribuição. Por exemplo, quando  $\beta = 1$ , a *pdf* da distribuição Weibull se reduz à distribuição Exponencial, dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\eta} e^{-\frac{t}{\eta}} \quad (3.11)$$

onde  $\frac{1}{\eta} = \lambda$ , que é a taxa de falha de valor constante.

No que concerne à função Taxa de Falha, o valor de  $\beta$  tem efeito substancial e inferências podem ser admitidas sobre as características de falha de uma população. A Figura 3.8 mostra estes diferentes efeitos do valor de  $\beta$  na forma da função Taxa de Falha.

Figura 3.8 – Funções Taxa de Falha Weibull para Diferentes Valores de  $\beta$



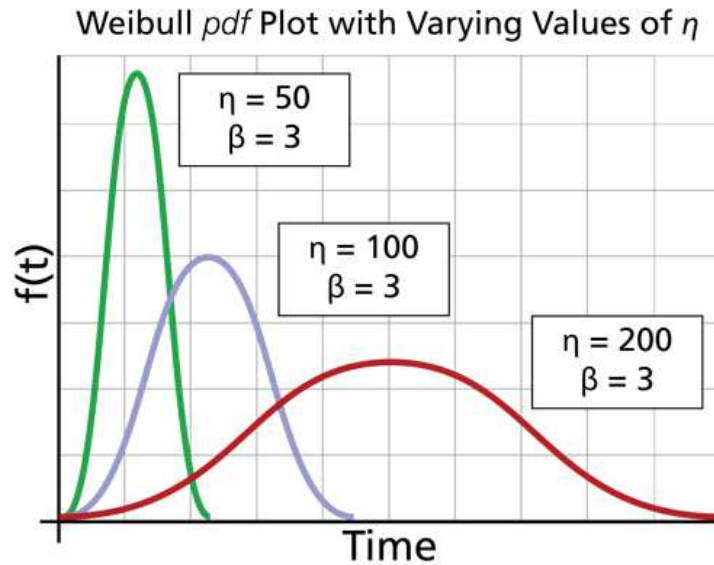
Fonte: Reliawiki (2011d).

Populações com  $\beta < 1$  apresentam taxa de falha decrescente, populações com  $\beta = 1$  têm taxa de falha constante enquanto populações com  $\beta > 1$  têm taxa de falha crescente.

### 3.3.2.2.2 Efeitos do Parâmetro de Escala $\eta$

Mudanças no valor do parâmetro de escala  $\eta$  tem o mesmo efeito na distribuição que aquelas provocadas por mudanças na escala do eixo das abcissas.

Figura 3.9 – Funções *pdf* da Distribuição Weibull para Diferentes Valores de  $\eta$



Fonte: Reliawiki (2011d).

Aumentando o valor de  $\eta$  enquanto  $\beta$  se mantém constante faz com que a *pdf* se alongue. Uma vez que a área sobre a curva *pdf* é sempre igual a 1, o pico da curva *pdf* irá decrescer. O contrário também ocorre: à medida que o valor de  $\eta$  é reduzido, a curva *pdf* é comprimida para a esquerda, fazendo com que a altura da curva aumente.

### 3.3.3 Distribuição Normal

A distribuição Normal é comumente usada para análises gerais de confiabilidade e tempos até falha de componentes, equipamentos ou sistemas mecânicos e eletrônicos.

A *pdf* da distribuição Normal é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.12)$$

onde  $\mu$  é a média e  $\sigma$  é o desvio padrão dos tempos para falha.

### 3.3.4 Outras Distribuições

Além das distribuições Exponencial, Weibull e Normal vistas anteriormente, outras distribuições também são utilizadas, tais como: Weibull Mista, Gama, Gama Generalizada, Logística, Loglogística e Gumbel.

Cada uma destas distribuições tem suas funções *pdf* características e a escolha entre uma ou outra distribuição dependerá de como esta se adere aos dados de vida disponíveis.

### 3.3.5 Estimativa de Parâmetros

Com a finalidade de ajustar a conformidade de um modelo estatístico a um conjunto de dados de vida, os parâmetros da distribuição devem ser estimados de forma a tornar a função mais aderente aos dados. Os parâmetros controlam a escala, a forma e a localização da função *pdf*.

Vários métodos têm sido desenvolvidos para estimar os parâmetros que irão ajustar uma distribuição de vida à um conjunto de dados em particular. Alguns métodos de estimativa de parâmetros disponíveis incluem Plotagem de Probabilidades, Análise de Regressão em  $x$  (RRX), Análise de Regressão em  $y$  (RRY) e Estimativa da Máxima Verossimilhança (MLE). (Reliawiki, 2011d).

O método de análise apropriado irá variar dependendo do conjunto de dados e, em alguns casos, da distribuição de vida selecionada.

## 3.4 ANÁLISE DE DADOS DE DEGRADAÇÃO

Dado que os produtos têm sido projetados com uma confiabilidade cada vez maior e desenvolvidos em um período de tempo cada vez menor, é frequente não ser possível testar novos projetos para falhar sobre condições normais de operação. O uso de análises de degradação é uma das opções para inferir o comportamento da confiabilidade nesta situação.

A análise de degradação envolve a medição de dados de desempenho que podem estar diretamente relacionados à falha presumida do produto em questão. Muitos mecanismos de falha podem estar diretamente ligados à degradação de uma

determinada parte ou componente do produto, e a análise de degradação permite que se extrapole para um tempo de falha presumido com base nas medidas de degradação ao longo do tempo.

Em alguns casos, é possível medir diretamente a degradação de uma característica física ao longo do tempo, como o desgaste de pastilhas de freio, a propagação do tamanho de trincas ou a degradação de uma característica de desempenho ao longo do tempo, como a tensão de uma bateria ou o fluxo luminoso de uma lâmpada LED. Esses casos pertencem à categoria Análise de Degradação Não-Destrutiva.

Em outros casos, a medição direta da degradação pode não ser possível sem técnicas de medição invasivas ou destrutivas que afetariam diretamente o desempenho subsequente do produto; portanto, apenas uma medida de degradação é possível. A medição da corrosão em um recipiente químico ou a medição de aderência de adesivos químicos são exemplos destes casos. Esses casos pertencem à categoria de Análise de Degradação Destrutiva.

Em ambos os casos, no entanto, é necessário definir um nível de degradação ou desempenho no qual é considerado como ocorrência de falha. No *software* Weibull++, este parâmetro é denominado Degradação Crítica. (SynthesisPlatform, 1992a)

Com esse nível de falha definido, é relativamente simples usar modelos matemáticos básicos para extrapolar as medidas ao longo do tempo até o ponto em que a falha ocorre. Uma vez determinados estes pontos, é apenas uma questão de analisar os tempos de falha extrapolados da mesma maneira que os dados convencionais de tempo até a falha.

#### 3.4.1 Modelos de Degradação

De acordo com MARTINS (2017), um modelo de degradação é constituído por uma curva que revela a evolução da degradação ou a queda de desempenho de um componente submetido a uma carga ao longo do tempo, distância percorrida ou número de ciclos. Certas propriedades degradam-se com a idade do componente e esta degradação pode ser acelerada através da aplicação de cargas superiores às máximas estabelecidas pelos fabricantes dos componentes ou ativos.

Os modelos utilizados para estimar a confiabilidade de um ativo ou componente, com base nos dados de degradação, podem ser classificados em dois grupos:

- Modelos baseados na física, ou seja, quando a lei de degradação é conhecida e é possível aplicar a física da falha para determinar a vida útil restante.
- Modelos baseados na estatística, ou seja, quando a lei de degradação não é conhecida, mas é possível registrar ao longo do tempo um parâmetro de degradação, de maneira a obter, através de modelos estatísticos, a informação necessária.

A análise de degradação compreende a medida e a extrapolação da degradação de um ou mais parâmetros ou dos dados de desempenho e/ou qualidade que estão relacionados com uma possível falha do componente ou ativo em estudo.

Uma vez definido o nível crítico de degradação, é possível construir um modelo de degradação e estimar a distribuição temporal até a falha.

Os modelos matemáticos são funções matemáticas que espelham o comportamento de um componente ou sistema em condições normais de funcionamento. O modelo deve apresentar uma aderência satisfatória aos dados coletados. A escolha do modelo reflete o fenômeno físico que ocorre na avaria, ou seja, como é que a evolução da degradação ou a queda de desempenho progredem ao longo do tempo, da distância percorrida ou do número de ciclos.

A seguir, serão explanados os modelos matemáticos mais comumente aplicados nas análises de degradação. Para todos estes modelos, os parâmetros são definidos como segue:

$y$  = Valor da degradação

$t$  = Tempo

$a, b, c$  = Parâmetros específicos para cada modelo de degradação.

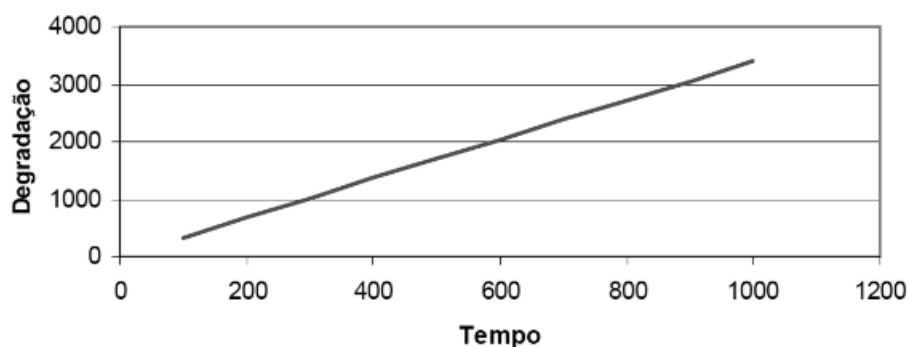
### 3.4.1.1 Modelo de Degradação Linear

O modelo linear é utilizado para estimar a tendência, recorrendo à técnica de regressão linear para estimar os parâmetros  $a$  e  $b$ , sendo definido pela seguinte expressão matemática:

$$y = a.t + b \quad (3.13)$$

A representação gráfica da função linear é dada na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Representação do Modelo de Degradação Linear



Fonte: MARTINS (2017).

### 3.4.1.2 Modelo de Degradação Exponencial

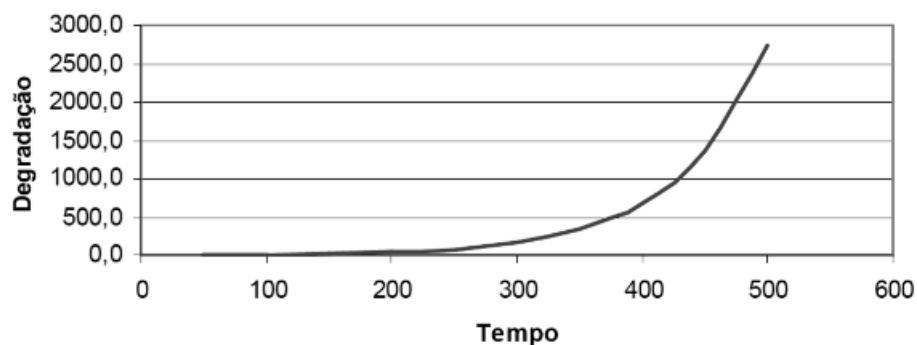
O modelo exponencial é utilizado com sucesso no ajuste de dados censurados, podendo também ser utilizado com dados de funções de risco constante. É definido pela seguinte expressão matemática:

$$y = b.e^{a.t} \quad (3.14)$$

A representação gráfica da função exponencial é dada na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Representação do Modelo de Degradação Exponencial



Fonte: MARTINS (2017).

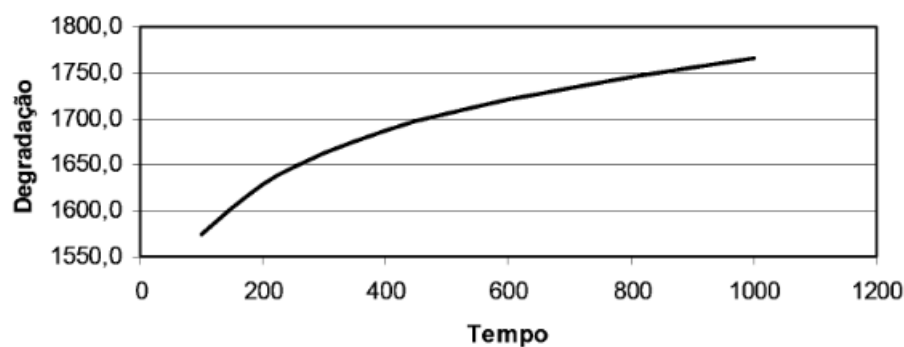
### 3.4.1.3 Modelo de Degradação Potência

O modelo de potência caracteriza-se por ser um modelo que representa com grande exatidão os mecanismos de degradação associados a fenômenos naturais, sendo definido pela seguinte expressão matemática:

$$y = b \cdot t^a \quad (3.15)$$

A representação gráfica da função potência é dada na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Representação do Modelo de Degradação Potência



Fonte: MARTINS (2017).

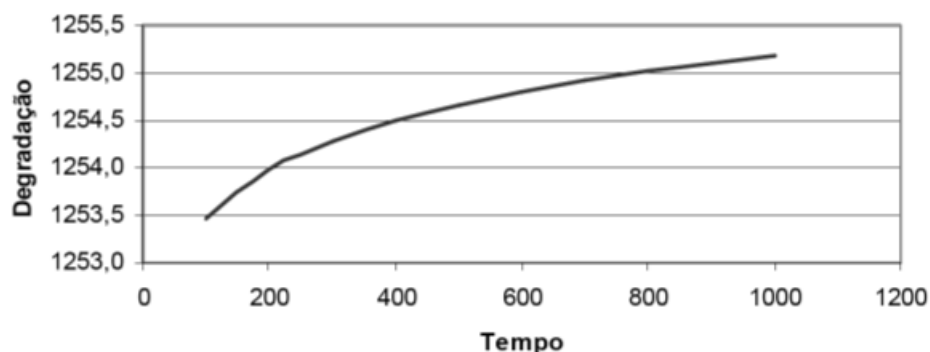
### 3.4.1.4 Modelo de Degradação Logarítmico

O modelo logarítmico é definido pela seguinte expressão matemática:

$$y = a \cdot \ln(t) + b \quad (3.16)$$

A representação gráfica da função linear é dada na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Representação do Modelo de Degradação Logarítmico



Fonte: MARTINS (2017).

#### 3.4.1.5 Modelo de Degradação Gompertz

O modelo Gompertz é aplicado na análise de dados de confiabilidade quando estes dados se encontram distribuídos uniformemente, sem grandes variações, sendo definido pela seguinte expressão matemática:

$$y(t) = a \cdot b^{c^t} \quad (3.17)$$

onde:

$a$  = Limite superior que a confiabilidade aproxima assintoticamente à medida que  $t \rightarrow \infty$ , ou a máxima confiabilidade que pode ser alcançada.

$b$  = Parâmetro de Referência;

$c$  = Índice padrão de Crescimento.

#### 3.4.1.6 Modelo de Degradação Lloyd-Lipow

O modelo Lloyd-Lipow tem como base um programa de testes composto por “n” etapas, cada uma delas formada por um dado número de ensaios e registradas como sucesso (S) ou falha (F), com o objetivo de melhorar a etapa anterior. O modelo de Lloyd-Lipow pode ser representado pela expressão matemática:

$$y = a - \frac{b}{t} \quad (3.18)$$

### 3.4.2 Tipos de Análise de Degradação

Uma vez compreendidos os modelos matemáticos aplicados nas análises de degradação, deve-se definir qual tipo de degradação se aplica ao ativo ou sistema a ser estudado.

Dois tipos de análises se distinguem: a análise de degradação destrutiva e não-destrutiva. Compreender as diferenças entre estas duas classificações é de grande importância, uma vez que o *software* Weibull++ tem módulos distintos para cada uma destas análises de degradação.

#### 3.4.2.1 Análise de Degradação Não-Destrutiva

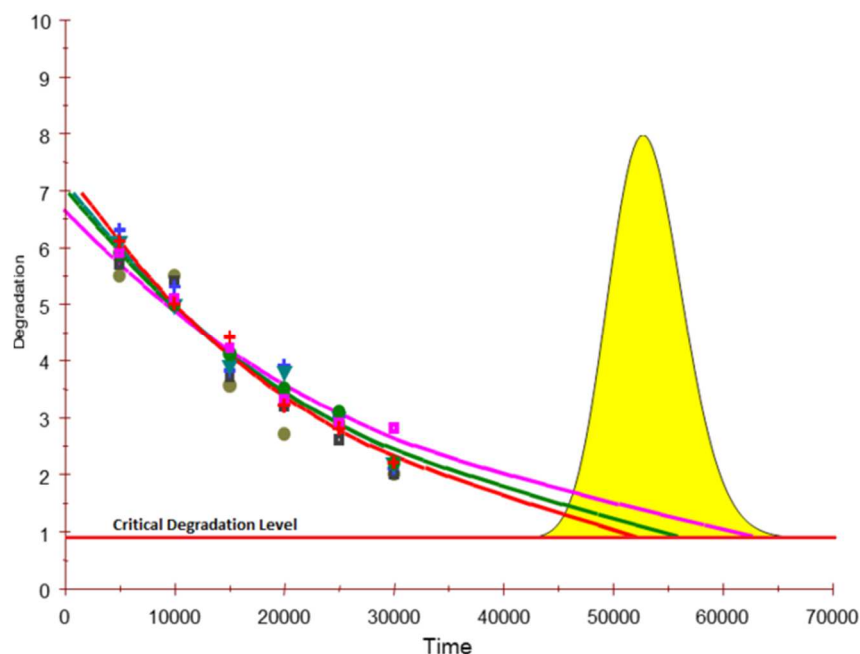
A análise de degradação não-destrutiva aplica-se a casos em que múltiplas medidas de degradação ao longo do tempo podem ser obtidas para cada amostra que será testada, ou seja, na mesma amostra é possível fazer repetidas medidas de degradação, sendo esta amostra mantida nos testes. (Reliawiki, 2011f)

Dado um nível definido de falha (ou o nível de degradação que seria considerado como falha), um dos modelos matemáticos de degradação vistos na seção 3.4.1 (Linear, Exponencial, Potência, Logarítmico, Gompertz ou Lloyd-Lipow) ou até mesmo um modelo definidos pelo usuário pode ser usado para extrapolar as medidas de degradação ao longo do tempo de cada amostra até o momento em que a falha ocorrerá. Uma vez que esses tempos de falha extrapolados são obtidos, é apenas uma questão de analisar os tempos de falha extrapolados da mesma maneira que os dados convencionais de tempo até falha.

Assim como na análise convencional de dados de vida, o grau de certeza nos resultados está diretamente relacionado ao número de amostras sendo testadas.

A Figura 3.14 combina as etapas da análise, mostrando a extrapolação das medições de degradação para um dado tempo de falha e a subsequente análise de distribuição desses tempos de falha.

Figura 3.14 – Relação entre as Etapas da Análise de Degradação Não-Destrutiva



Fonte: Reliawiki (2011f).

Uma vez que os parâmetros  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$  tenham sido estimados para cada amostra  $i$ , um tempo  $t_i$  pode ser extrapolado, o qual corresponde ao nível de degradação crítica  $y$  previamente definido. Os valores computados de  $t_i$  podem agora ser usados como tempos até a falha ou TTF (*Time-To-Failure*) numa análise de dados de vida subsequente.

No módulo de análise de degradação não-destrutiva do *software* Weibull++ é possível selecionar como Modelo de Dados de Vida qualquer um dos seguintes modelos de distribuição: Weibull (1P, 2P e 3P), Weibull Mista, Exponencial (1P, 2P), Lognormal, Normal, Gama, Gama Generalizada, Logística, Loglogística ou Gumbel.

O Modelo de Dados de Vida selecionado utilizará como tempos até a falha ou TTF (*Time-To-Failure*) aqueles obtidos através da extrapolação das medidas de degradação pelo respectivo Modelo de degradação previamente definido.

É através do Modelo de Dados de Vida selecionado que as principais métricas que interessam à Engenharia de Confiabilidade serão determinadas, tais como a Confiabilidade, a Probabilidade de Falha, a Confiabilidade Condicional, a Probabilidade de Falha Condicional, o Tempo de Garantia, a Vida BX%, a Vida Média, a Vida Média Restante e a Taxa de Falha.

No módulo de degradação não-destrutiva do Weibull++, estas métricas são calculadas por meio da ferramenta QCP (*Quick Calculation Pad*).

### 3.4.2.2 Análise de Degradação Destrutiva

A Análise de degradação Destrutiva aplica-se aos casos nos quais a amostra tem que ser destruída a fim de se obter a(s) medida(s) de degradação. Apenas uma medição pode ser feita por unidade, após a qual a amostra é descartada do teste. Como resultado, as medições de degradação em múltiplas amostras são requeridas em diferentes instantes de tempo, de forma distribuída ao longo de todo o tempo que será considerado na análise.

A Análise de Degradação Destrutiva mostra semelhanças com o método usado na Análise de Teste de Vida Acelerada ou ALTA (*Accelerated Life Testing Analysis*), onde o parâmetro de escala da distribuição de medição de degradação (por exemplo,  $\eta$  para a distribuição Weibull e  $\mu$  para a distribuição Normal) é assumido mudar com o tempo, enquanto o parâmetro de forma (por exemplo,  $\beta$  para a distribuição Weibull e  $\sigma$  para a distribuição Normal) permanece constante. Nesse caso, o tempo passa a ser o “fator de estressamento”, enquanto a medida de degradação se torna a variável aleatória, em vez do tempo até falha ou TTF (*Time-To-Failure*), como ocorre na Análise de Teste de Vida Acelerada.

Dado um nível definido de falha (ou o nível de degradação que seria considerado como falha), a probabilidade de a medição da degradação estar além desse nível em um determinado momento pode então ser obtida.

#### 3.4.2.2.1 Modelando a Análise de Degradação Destrutiva

No caso de análises de degradação destrutivas, tem-se apenas uma medida de degradação para cada item testado, impossibilitando construir um modelo de degradação para cada item individual e usá-lo para prever o tempo de falha. (Weibull, 2008).

Portanto, uma distribuição estatística é necessária para representar a variabilidade na medição em um determinado momento. Esse método é chamado de Método de Modelagem de Processo Aleatório.

Nesse método, o valor de degradação é assumido como sendo uma variável aleatória que segue uma determinada distribuição em um dado instante. No módulo de Análise de Degradação Destrutiva do Weibull ++, esta distribuição é identificada

como “Distribuição de Medição” e, ao contrário do que ocorre na Análise de Degradação Não-Destrutiva, apenas alguns modelos de distribuição de dados de vida vistos na seção 3.3 podem ser utilizados, a saber: Weibull-2P, Exponencial, Normal, Lognormal e Gumbel.

Conforme explicado na seção 3.4.2.2, a Análise de Degradação Destrutiva mostra semelhanças com o método usado na Análise de Teste de Vida Acelerada ou ALTA (*Accelerated Life Testing Analysis*), onde o parâmetro de escala da distribuição de medição de degradação (por exemplo,  $\eta$  para a distribuição Weibull e  $\mu$  para a distribuição Normal) é assumido mudar com o tempo, enquanto o parâmetro de forma (por exemplo,  $\beta$  para a distribuição Weibull e  $\sigma$  para a distribuição Normal) permanece constante. Nesse caso, o tempo passa a ser o “fator de estressamento”, enquanto a medida de degradação se torna a variável aleatória.

O Método de Modelagem de Processo Aleatório requer que os parâmetros de escala sejam definidos em todo o domínio de  $-\infty$  a  $\infty$ . No entanto,  $\eta$  para a distribuição de Weibull e o MTTF (*Mean Time To Failure*) para a distribuição Exponencial são sempre maiores que zero. Assim, logaritmos naturais desses parâmetros são usados no Método de Modelagem de Processos Aleatórios. (Reliasoft, 2019).

Para cada distribuição, os parâmetros são definidos da seguinte forma:

- Weibull:  $\ln(\eta)$  é definido como uma função do tempo enquanto  $\beta$  permanece constante.
- Exponencial:  $\ln(MTTF)$  é definido como uma função do tempo.
- Normal:  $\mu$  é definido como uma função do tempo enquanto  $\sigma$  permanece constante.
- Lognormal:  $\mu'$  é definido como uma função do tempo enquanto  $\sigma'$  permanece constante.
- Gumbel:  $\mu$  é definido como uma função do tempo enquanto  $\sigma$  permanece constante.

Uma vez selecionado o modelo de Distribuição de Medição, um dos Modelos de Degradação vistos na seção 3.4.1 (com exceção do modelo Gompertz e modelos definidos pelo usuário) também precisa ser definido para representar as variações do parâmetro de escala no tempo, devendo-se também considerar que serão usados os logaritmos naturais destes parâmetros de escala.

Assim, caso seja selecionado Weibull como modelo de Distribuição de Medição e para representar a variação do parâmetro de escala com o tempo seja selecionado o Modelo de Degradação Linear, a função que representa esta variação é dada por:

$$\ln(\eta(t)) = b + a \cdot t \quad (3.19)$$

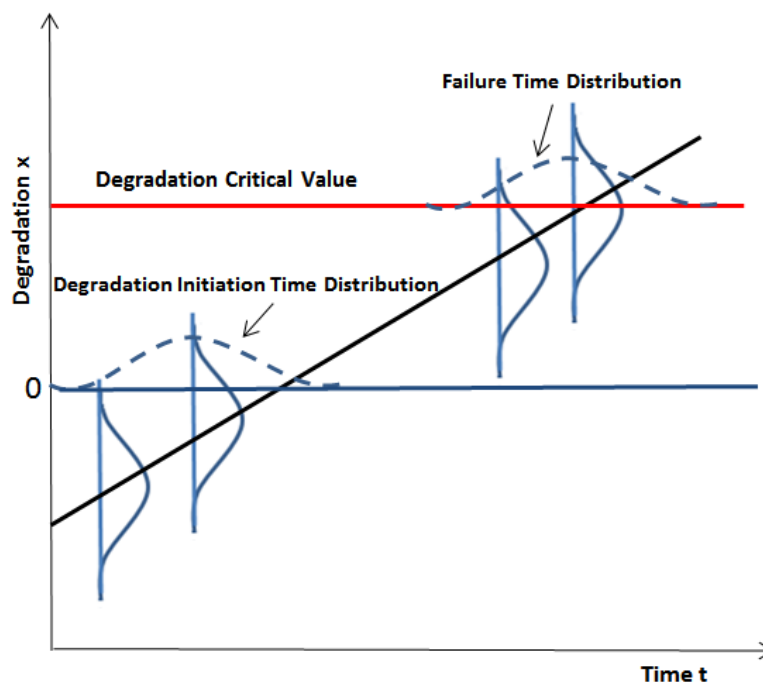
Caso seja escolhido o modelo Exponencial de degradação:

$$\ln(\eta(t)) = b \cdot e^{at} \quad (3.20)$$

Depois que o modelo de Distribuição de Medição e o Modelo de Degradação são escolhidos e seus respectivos parâmetros são definidos, estes parâmetros são então calculados usando o método da Estimativa de Máxima Verossimilhança (MLE).

A relação entre a distribuição da medição de degradação e a distribuição do tempo de falha é ilustrada na Figura 3.15. (Weibull, 2015).

Figura 3.15 – Distribuição de Degradação e de Tempo de Falha



Fonte: Reliawiki (2011f).

### 3.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi abordado o embasamento teórico necessário ao estudo de caso que será desenvolvido no Capítulo 4. Foram detalhadas as principais métricas utilizadas na Engenharia de Confiabilidade, bem como foram apresentados os fundamentos da Análise de Dados de Vida, abordando as diferentes classificações de dados de vida e os principais modelos de distribuição utilizados na respectiva análise.

Foco especial foi dado à análise de degradação, para o qual se volta a aplicação prática deste estudo. Foram apresentados os principais modelos matemáticos de degradação, bem como foi feita uma diferenciação entre as Análises de Degradação Destrutiva e Não-destrutiva.

O próximo capítulo apresenta a aplicação prática deste estudo, no qual o forno de indução *core/less* Premelt apresentado no Capítulo 2 será analisado de forma a inferir a condição do revestimento refratário deste forno, em vista da degradação que o mesmo apresenta devido aos fenômenos de desgaste e deposição de óxidos na parede refratária, ambos alterando as características ideais de operação do forno, conduzindo-o a falhas que o tornam inoperante.



## 4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, o referencial teórico do Capítulo 3 relativo à Análise de Degradação será aplicado na solução de um estudo de caso, conforme abordado no Capítulo 2. Serão detalhados os procedimentos utilizados para coleta e análise de dados, as considerações e simplificações adotadas, bem como os resultados obtidos a partir da análise realizada.

### 4.1 LEVANTAMENTO E PREPARAÇÃO DOS DADOS

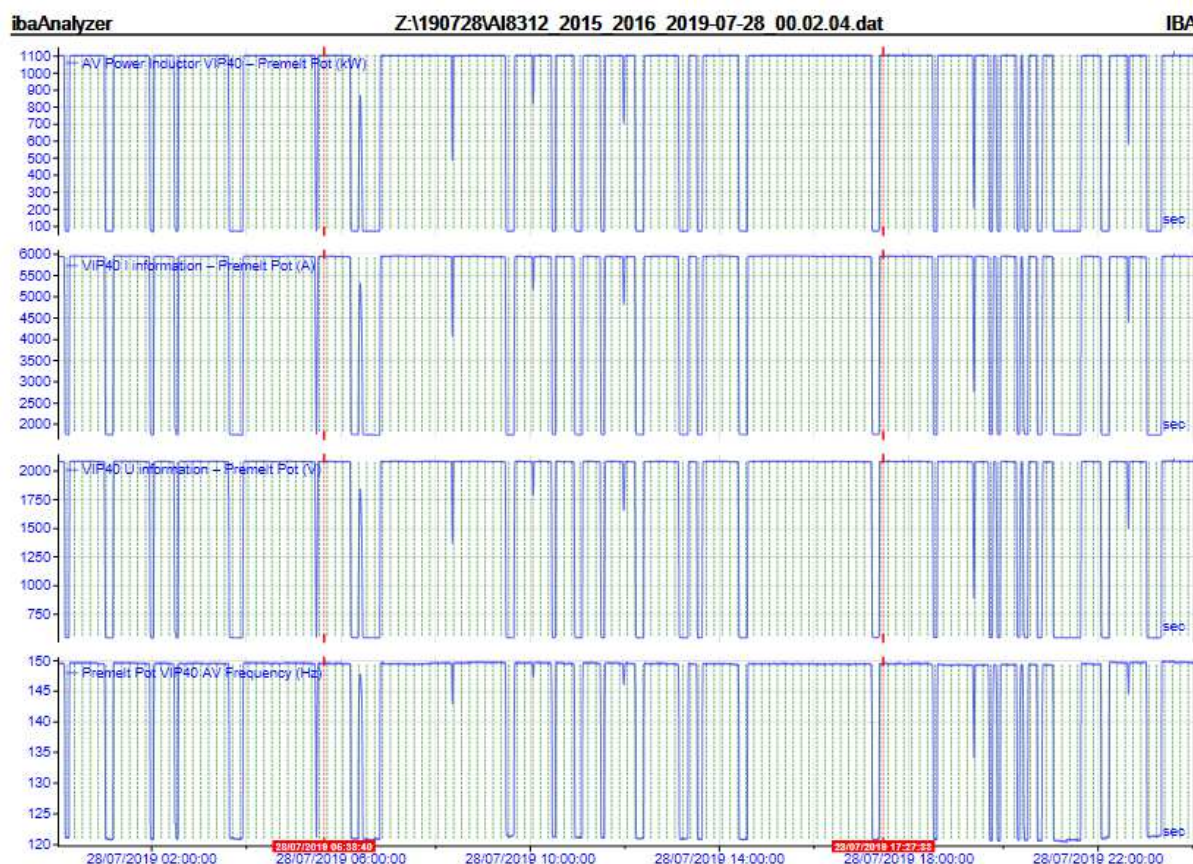
Conforme detalhado no Capítulo 2, uma vez que o forno Premelt está constantemente carregado, a degradação da parede refratária não pode ser controlada diretamente. Entretanto, com base em estudos de fabricantes e de especialistas neste tipo de forno, foi possível estabelecer uma relação entre as alterações que ocorrem no revestimento refratário do forno com a corrente que circula na bobina primária de indução, a qual circunda toda a parede do forno.

Os dados de corrente da bobina foram coletados a partir do sistema de aquisição de dados ibaPDA (*Process Data Acquisition*), baseado na arquitetura de um microcomputador que atua como servidor do sistema. Os dados aquisitados são armazenados no disco rígido do computador, na forma de arquivos em série, num intervalo de tempo definido. A aquisição é feita através de componentes de *hardware* distribuídos por todo o sistema de automação de processo, conectados através de fibra óptica ou outros meios, tais como PROFIBUS-DP.

Na Linha de Galvanização N° 2 da ArcelorMittal Vega, todos os Controladores Lógicos Programáveis (CLP) estão interligados ao sistema ibaPDA. Para o controle do sistema de aquecimento dos potes de metal líquido, utiliza-se um controlador SIEMENS S400, por meio do qual foi feita aquisição dos dados do forno Premelt.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram como os dados são aquisitados pelo sistema ibaPDA. Na Figura 4.1 verifica-se o registro das quatro grandezas elétricas relativas à bobina primária do forno, registradas ao longo de 24 horas no dia 28/07/2019: Potência Ativa (kW), Corrente (A), Tensão (V) e Frequência (Hz).

Figura 4.1 – Potência, Corrente, Tensão e Frequência da Bobina do Forno



Fonte: ibaPDA – ArcelorMittal Vega (2019).

Observa-se na Figura 4.1 a existência de dois marcadores de tempo (linhas em vermelho), os quais o usuário posiciona de acordo com o instante de interesse a ser observado. A Figura 4.2 complementa a Figura 4.1, apresentando os respectivos valores das grandezas representadas nos gráficos, nos respectivos tempos definidos pelos dois marcadores.

Figura 4.2 – Valores de Potência, Corrente, Tensão e Frequência da Bobina

SignalName	X1	X2	X2 - X1	Y1	Y2	Y2 - Y1	Unit
1 AV Power Inductor VIP40 - Premelt...	28/07/2019 05:38:...	28/07/2019 17:27:...	11:48:53	1102.86	1103.30	0.43	kW
2 VIP40 I information - Premelt Pot	28/07/2019 05:38:...	28/07/2019 17:27:...	11:48:53	5950.52	5948.35	-2.17	A
3 VIP40 U information - Premelt Pot	28/07/2019 05:38:...	28/07/2019 17:27:...	11:48:53	2085.94	2084.20	-1.74	V
4 Premelt Pot VIP40 AV Frequency	28/07/2019 05:38:...	28/07/2019 17:27:...	11:48:53	149.65	149.54	-0.12	Hz

Fonte: ibaPDA – ArcelorMittal Vega (2019).

Na Figura 4.2, observa-se que no tempo X1 (05:38h), os correspondentes valores de potência ativa da bobina (1102,86 kW), corrente da bobina (5.950,52 A),

tensão da bobina (2085,94 V) e a frequência (149,65 Hz) são mostrados na coluna Y1. Similarmente, no tempo X2 (17:27h), os correspondentes valores de potência ativa da bobina (1103,30 kW), corrente da bobina (5.948,35 A), tensão da bobina (2084,20 V) e a frequência da corrente (149,54 Hz) são mostrados na coluna Y2.

Embora a única grandeza que será utilizada para análise de degradação seja a corrente da bobina, a potência ativa também foi coletada de forma a referenciar o momento adequado que os marcadores de tempo deveriam ser posicionados, uma vez que somente deveriam ser coletados valores de corrente quando a potência da bobina estivesse no seu valor máximo, que atualmente encontra-se limitado em 1.100 kW. As demais grandezas foram registradas apenas para evidenciar como estas variam em função da potência, não tendo influência para a análise em curso.

Tendo sido registrados as grandezas acima mencionadas de forma ininterrupta no período de 20 de abril a 29 de julho de 2019, de cada um destes registros foi coletado um valor de corrente por dia para compor a base de dados que será utilizada na análise de degradação no software Weibull++, conforme mostrado no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Valores de corrente da bobina entre 20/04/2019 a 29/07/2019

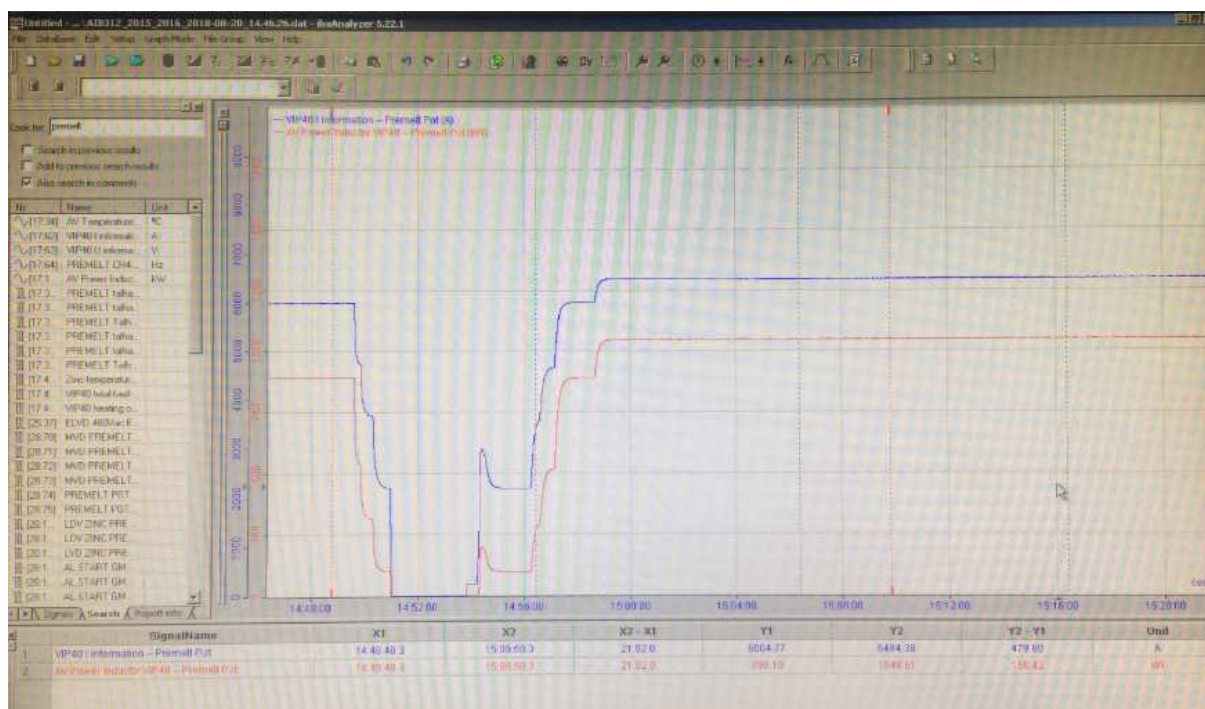
CAMPANHA1		CAMPANHA2		CAMPANHA3		CAMPANHA4		CAMPANHA5		CAMPANHA6	
Data de Medição	Medição Corrente (A)	Data de Medição	Medição Corrente (A)	Data de Medição	Medição Corrente (A)	Data de Medição	Medição Corrente (A)	Data de Medição	Medição Corrente (A)	Data de Medição	Medição Corrente (A)
20/04/2019	6428	10/05/2019	6280	24/05/2019	6239	22/06/2019	6054	05/07/2019	6026	20/07/2019	5987
21/04/2019	6418	11/05/2019	6273	25/05/2019	6256	23/06/2019	6046	06/07/2019	6022	21/07/2019	5972
22/04/2019	6410	12/05/2019	6273	26/05/2019	6239	24/06/2019	6041	07/07/2019	6011	22/07/2019	5976
23/04/2019	6378	13/05/2019	6219	27/05/2019	6236	25/06/2019	6046	08/07/2019	5996	23/07/2019	5974
24/04/2019	6373	14/05/2019	6232	28/05/2019	6217	26/06/2019	6039	09/07/2019	5999	24/07/2019	5966
25/04/2019	6356			29/05/2019	6193	27/06/2019	6035	10/07/2019	5983	25/07/2019	5957
26/04/2019	6336			30/05/2019	6202	28/06/2019	6030	11/07/2019	5991	26/07/2019	5957
27/04/2019	6343			31/05/2019	6189	29/06/2019	6016			27/07/2019	5944
28/04/2019	6339			01/06/2019	6176	30/06/2019	6013			28/07/2019	5950
29/04/2019	6339			02/06/2019	6171	01/07/2019	6015			29/07/2019	5941
30/04/2019	6330			03/06/2019	6137	02/07/2019	6018				
01/05/2019	6313			04/06/2019	6132						
02/05/2019	6315			05/06/2019	6137						
03/05/2019	6308			06/06/2019	6113						
04/05/2019	6295			07/06/2019	6103						
05/05/2019	6289			08/06/2019	6106						
06/05/2019	6286			09/06/2019	6091						
07/05/2019	6289			10/06/2019	6089						
				11/06/2019	6061						
				12/06/2019	6052						
				13/06/2019	6052						

Fonte: o autor (2019).

Observa-se no Quadro 4.1 que a corrente da bobina está apresentando um comportamento decrescente com o tempo. Este decréscimo no valor da corrente tem sido constatado desde a data de 20 de agosto de 2018, quando o forno entrou em operação após o revestimento refratário ter sido substituído devido a falha de isolamento da bobina.

A Figura 4.3 evidencia que a corrente da bobina no primeiro dia que o forno foi disponibilizado para uso após a troca do revestimento refratário atingia valores próximos de 6500 A (a corrente nominal da bobina é 7500 A).

Figura 4.3 – Valores de Potência e Corrente da Bobina em 20 de Agosto de 2018



Fonte: ibaPDA – ArcelorMittal Vega (2019).

Observa-se na Figura 4.3 que no dia 20 de agosto de 2018, primeiro dia que o forno foi disponibilizado para uso após a troca do revestimento refratário, o valor de corrente da bobina era de 6484,38 A para uma potência ativa de 1048,61 kW.

Este valor de corrente é bem maior que os valores registrados a partir de 20 de abril de 2019, evidenciando que, aproximadamente um ano após a entrada em operação, ocorreram alterações substanciais na parede do forno que alteraram o acoplamento da bobina com a carga líquida do forno, fazendo com que um menor valor de corrente seja necessário para produzir a mesma quantidade de calor necessária para o aquecimento do banho metálico.

Dado que nenhuma alteração foi realizada na bobina, nem no circuito elétrico que a alimenta e que as características da carga também não se alteraram neste período, é possível afirmar que a decréscimo contínuo dos valores de corrente da bobina é decorrente de alterações na parede refratária do forno. Conforme visto no Capítulo 2, esta diminuição ocorre devido ao desgaste da parede do revestimento refratário, que melhora o acoplamento da bobina com a carga e reduz as perdas de calor por condução e radiação na bobina e na carcaça metálica externa do forno, melhorando, por conseguinte, a eficiência global do forno.

Entretanto, esta redução da espessura traz consequências indesejáveis, pois facilita a infiltração de metal no revestimento refratário e uma vez que este metal infiltrado entra em contato com a bobina, o forno fica impossibilitado de ser energizado.

Portanto, é de grande importância o controle desta degradação, para que sejam tomadas previamente as devidas providências antes que esta atinja um nível crítico.

#### 4.2 ANÁLISE DOS DADOS NO SOFTWARE WEIBULL++

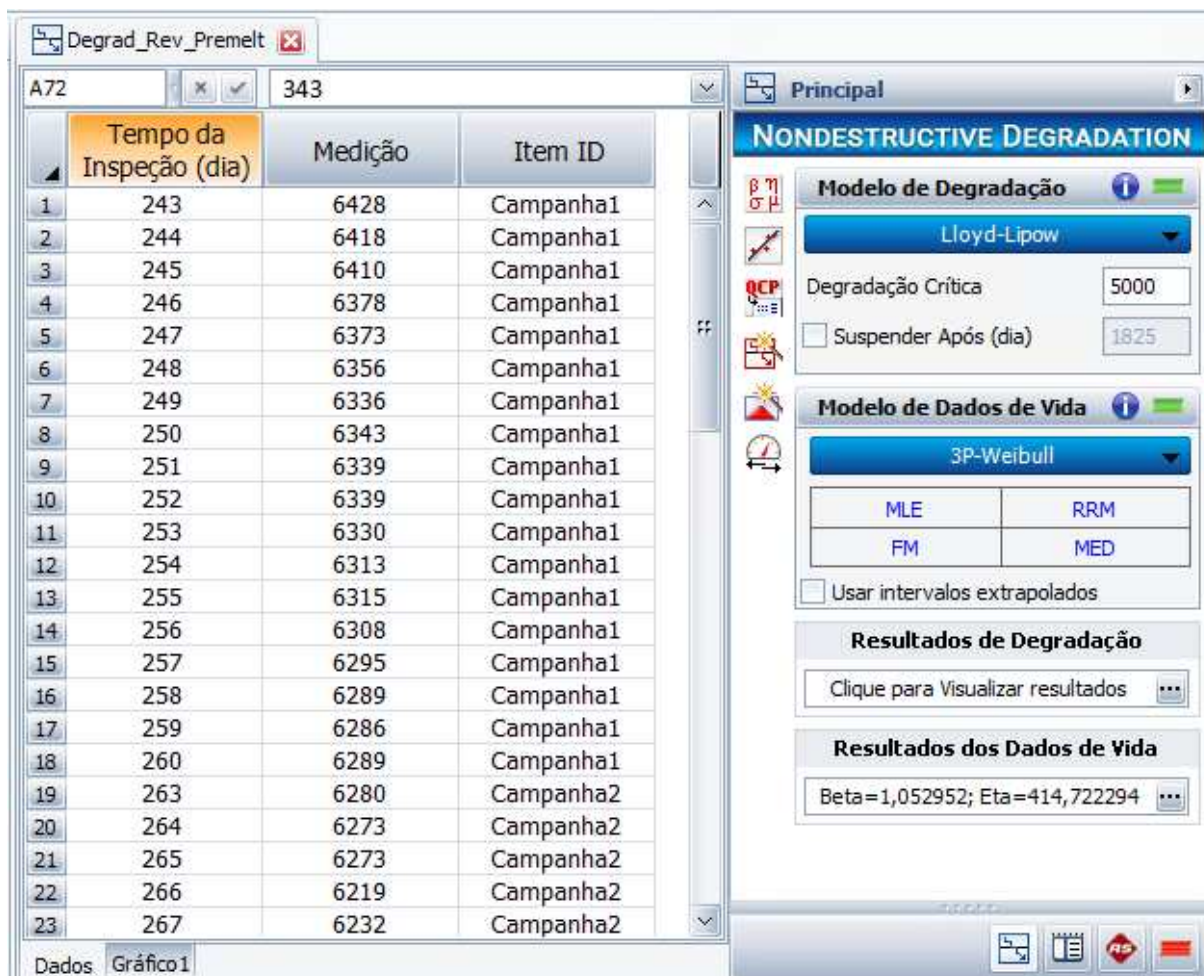
Após a formatação dos dados de corrente da bobina primária do forno Premelt conforme Quadro 4.1, estes foram inseridos no módulo de Análise de Degradação Não-destrutiva do Weibull++.

Na Figura 4.4. à esquerda observa-se uma parte dos dados de degradação precedidos dos seus respectivos tempos de inspeção. À direita, o Painel Principal mostra os modelos e parâmetros utilizados para esta análise.

A coluna “Tempo da Inspeção (dia)” informa quantos dias após a data referencial de 20 de agosto de 2018 foram colhidas as amostras de corrente. Esta data refere-se ao dia em que o forno foi colocado em alta potência pela primeira vez, após ter o revestimento refratário substituído. Portanto, o valor 243 dias na linha 1 significa que se passaram 243 dias desde o reinício de operação do forno, o que corresponde à data inicial de análise (17/04/2019). O último valor de corrente coletado ocorreu no dia 29/07/2019, correspondendo a 343 dias após o reinício de operação do forno (não aparente na Figura 4.4).

A coluna “Medição” apresenta os valores da corrente da bobina em Ampère (A), coletada sempre quando o forno se encontrava em potência máxima.

Figura 4.4 – Carregamento dos Dados no Weibull++



Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

A coluna “Item ID” identifica a campanha em que foram coletados os valores de corrente. Esta divisão é essencial para que se obtenha diversos tempos de vida extrapolados, necessários a uma adequada análise de dados de vida.

Uma campanha é um período no qual determinado aço é revestido com um tipo específico de revestimento. O forno Premelt é usado na sua capacidade máxima de corrente e potência apenas durante as campanhas de material Galvalume®, quando ele é utilizado para abastecer o forno principal da linha de galvanização.

É esta divisão das medições em diferentes campanhas que permitirá a análise de distribuição de vida dos dados, pois para cada campanha será calculado um tempo de falha extrapolado e estes tempos de falha é que servirão de base para o respectivo modelo de dados de vida implementar o cálculo das métricas de confiabilidade. Como mostra o Quadro 4.1, foram coletados os dados de corrente durante seis diferentes campanhas, entre 20 de abril a 29 de julho de 2019.

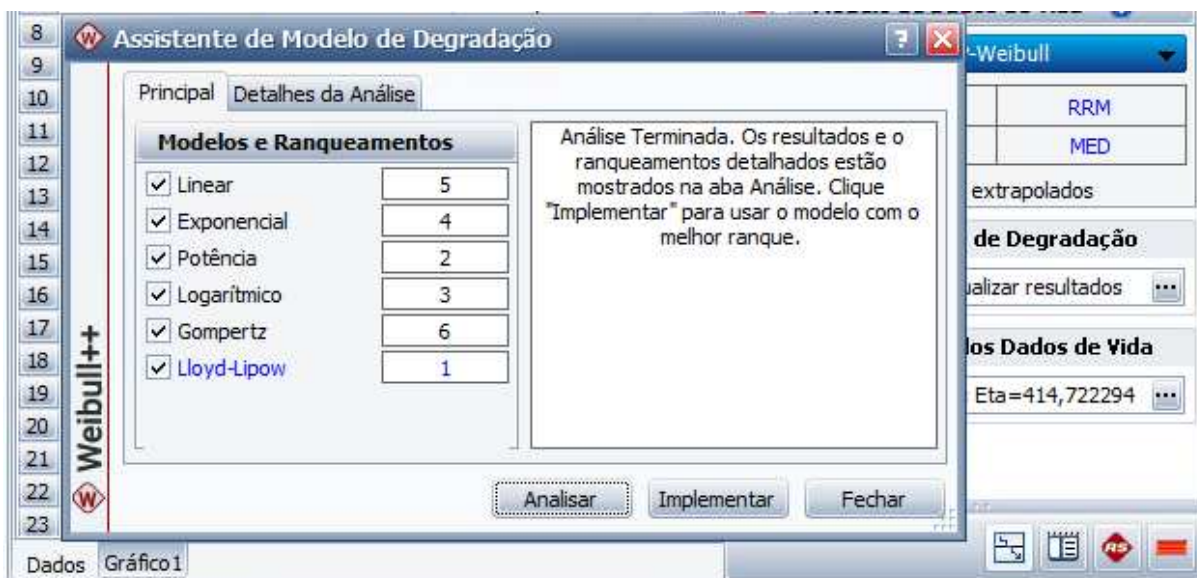
Observa-se também no Painel Principal da Figura 4.4 o campo Degradação Crítica, ao qual foi atribuído o valor de 5000 Ampère (A). Este valor foi atribuído com base em alguns registros históricos de corrente disponíveis, bem como nas condições operacionais atuais da linha, cuja velocidade de processamento se encontra em 200 metros por minuto, exigindo maior eficiência do processo de fusão e maior velocidade de abastecimento do pote principal. Portanto, um valor de corrente abaixo de 5000 Ampère (A) impedirá que o forno desempenhe suas funções conforme esperado.

Uma vez carregados os dados na tabela do módulo de degradação do Weibull++, deve-se selecionar os modelos de degradação e de distribuição de dados de vida a serem utilizados na análise (SynthesisPlatform, 1992b).

Para esta seleção, fez-se a escolha dos modelos com melhor ranqueamento atribuído pelos assistentes de modelo de degradação e de distribuição.

Para o modelo de degradação, o Assistente de Modelo de Degradação ranqueou o modelo Lloyd-Lipow como o mais aderente aos dados, conforme evidenciado na Figura 4.5.

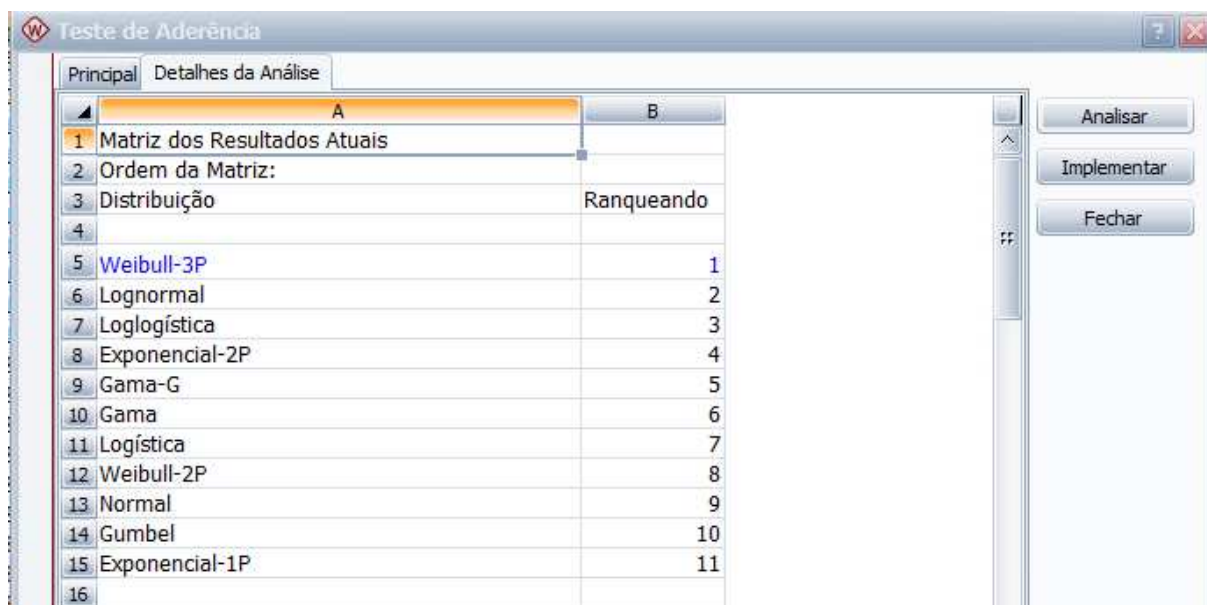
Figura 4.5 – Ranqueamento dos Modelos de Degradação



Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

Para o modelo de distribuição, o Assistente de Distribuição indicou o modelo Weibull-3P como o que apresenta maior aderência aos dados, conforme mostra a Figura 4.6.

Figura 4.6 – Ranqueamento dos Modelos de Distribuição



Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

A Figura 4.7 apresenta o relatório de Resultados de Degradação para o modelo Lloyd-Lipow.

Figura 4.7 – Relatório de Resultados para o Modelo de Degradação Lloyd-Lipow

Relatório de Resultados					
Tipo de Relatório	Resultados Aderência da Degradação				
Informações do Usuário					
Nome	welligton.moreira welligton.moreira				
Empresa					
Data	30/07/2019				
Parâmetros					
Item ID	Parâmetro a	Desvio-Padrão - a	Parâmetro b	Desvio-Padrão - b	
Campanha1	4296,463173	129,818906	-514079,8866	32628,6075	
Campanha2	2281,985537	1409,602007	-1,052925E+6	373528,5739	
Campanha3	3138,536774	94,972276	-864465,1537	27238,837	
Campanha4	4739,80895	146,989442	-401858,1335	45706,62635	
Campanha5	3759,104788	379,958206	-722828,3705	122339,4623	
Campanha6	4345,819739	164,808166	-547173,0166	55781,5388	

Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

Observa-se na Figura 4.7 que, para cada conjunto de dados de cada campanha (Item ID), foram estimados os parâmetros  $a$  e  $b$  para a função que representa o modelo Lloyd-Lipow, conforme explanado na seção 3.4.1.6.

$$y = a - \frac{b}{t}$$



onde  $y$  representa o valor da degradação,  $t$  é o tempo e  $a$  e  $b$  são parâmetros do modelo Lloyd-Lipow.

Para calcular o tempo de falha extrapolado para os dados de degradação de cada campanha, substitui-se o valor de  $y$  por  $y_{crit}$ , isto é, o valor de Degradação Crítica da corrente elétrica (5000 A) e substitui-se os parâmetros  $a$  e  $b$  pelos seus respectivos valores dados pelo relatório de Resultados de Degradação. Para a campanha 1, o valor do tempo extrapolado será igual a 730,707859. Isto significa que, pelos dados coletados na campanha 1, é esperado que o forno atinja o nível de degradação crítica (5000 A) aproximadamente 730 dias após a data de reinício de operação (20 de agosto de 2018).

Fazendo-se a mesma extrapolação para as campanhas 2, 3, 4, 5 e 6, o conjunto de dados extrapolados poderá ser então aplicado em um modelo de distribuição para o cálculo de métricas de confiabilidade. A Figura 4.8 apresenta o Relatório de Tempos Extrapolados calculados para cada uma destas campanhas.

Figura 4.8 – Relatório de Tempos Extrapolados de Falha

Relatório de Resultados		
Tipo de Relatório	Tempos Extrap. Falha/Suspensão	
Informações do Usuário		
Nome	welligton.moreira welligton.moreira	
Empresa		
Data	30/07/2019	
Tempos		
F/S	Tempo até F/S	Item ID
F	730,7078557	Campanha1
F	387,387506	Campanha2
F	464,4008765	Campanha3
F	1544,473314	Campanha4
F	582,5055682	Campanha5
F	836,4254455	Campanha6

Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

Observa-se na Figura 4.8 que os dados de degradação da campanha 2 conduziram ao menor tempo de falha extrapolado, enquanto os dados de degradação da campanha 4 resultaram no maior tempo de falha extrapolado. Estas variações refletem o comportamento do conjunto de dados coletados na referida campanha, os quais têm relação direta com a intensidade de degradação, mas também com os critérios adotados para coleta destes dados. A adoção de critérios adequados para a coleta de dados resulta em maior precisão e coerência dos tempos de falha obtidos.

A Figura 4.9 apresenta o relatório Resultados dos Dados de Vida, obtido a partir dos tempos de falha extrapolados das campanhas 1 a 6, os quais foram ajustados para o modelo selecionado de Análise de Dados de Vida Weibull-3P.

Figura 4.9 – Relatório Resultados dos Dados de Vida

<b>Relatório de Resultados</b>			
Tipo de Relatório	Resultados de Degradação		
<b>Informações do Usuário</b>			
Nome	welligton.moreira welligton.moreira		
Empresa			
Data	30/07/2019		
<b>Parâmetros</b>			
Distribuição	Weibull 3P		
Análises	MLE		
Método do IC	FM		
Ranqueando	MED		
Beta	1,052952		
Eta (dia)	414,722294		
Gama (dia)	351,585693		
Valor da LK	-42,026258		
F \ S	6 \ 0		
<b>LOCAL VAR/COV MATRIX</b>			
Var-Beta=0,112545	CV Eta Beta=18,350907		
CV Eta Beta=18,350907	Var-Eta=28847,305691		
<b>Dados Brutos</b>			
Número do Item	Condição F ou S	Tempo até F ou S (dia)	Subset ID 1
1	F	387,387506	Campanha2
2	F	464,4008765	Campanha3
3	F	582,5055682	Campanha5
4	F	730,7078557	Campanha1
5	F	836,4254455	Campanha6
6	F	1544,473314	Campanha4

Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

Observa-se no relatório da Figura 4.9 que para o modelo de distribuição Weibull-3P foram estimados os seguintes valores para os parâmetros de forma  $\beta$ , de escala  $\eta$  e de localização  $\gamma$ :

$$\beta = 1,052952 \text{ (adimensional)}$$

$$\eta = 414,722294 \text{ (dias)}$$

$$\gamma = 351,585693 \text{ (dias)}$$

O valor de  $\beta = 1,052952$  indica que a curva *pdf* será positivamente inclinada para a direita (cauda à direita), como será mostrado na Figura 4.11. Uma população com valores de  $\beta > 1$  implica que a taxa de falha é crescente com o tempo.

O parâmetro de escala  $\eta$  (ou vida característica), define onde a maior parte da distribuição falha. Para os tempos de falha extrapolados obtidos, foi obtido um valor de  $\eta = 414,722294$  dias.

O valor de  $\gamma = 351,585693$  dias representa um deslocamento da distribuição no eixo do tempo. Significa que entre a data de reinício de operação do forno e 351,585693 dias após esta data, a confiabilidade é sempre 100%, ou seja, não houve nenhuma probabilidade de falha ocorrer neste período. Considera-se como falha um valor de corrente abaixo de 5000 A.

Uma vez conhecidos os parâmetros dos modelos de degradação e de distribuição, bem como os tempos de falha extrapolados, a próxima seção abordará a representação gráfica e a principais métricas obtidas desta análise de degradação.

#### 4.3 GRÁFICOS DE TENDÊNCIA E MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE

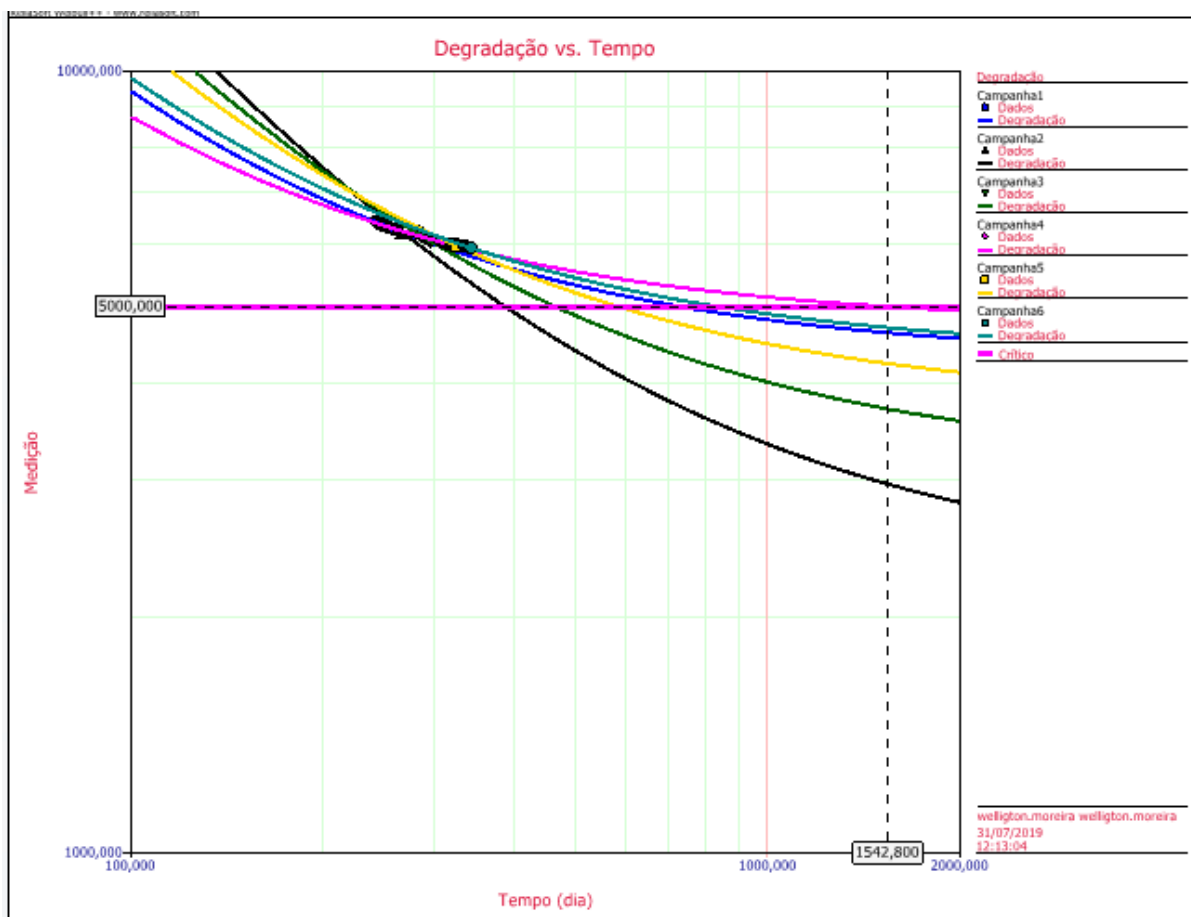
Após a execução da Análise de Degradação, os resultados podem ser plotados em gráficos através da ferramenta “Gráfico” do Weibull++. O tipo de gráfico desejado é selecionado no Painel de Controle, estando disponíveis dois conjuntos de gráficos: gráficos de degradação e gráficos de análise de dados de vida. Alguns destes gráficos serão mostrados nesta seção.

Outra importante ferramenta disponível no Weibull++ é o QCP (*Quick Calculation Pad*), através da qual é possível calcular as métricas envolvidas na análise de dados de vida.

A análise conjunta de gráficos e métricas nos permite inferir a confiabilidade geral da instalação em análise.

Na Figura 4.10, observa-se a tendência de degradação numa escala de tempo logarítmica.

Figura 4.10 – Curva de Degradação x Tempo

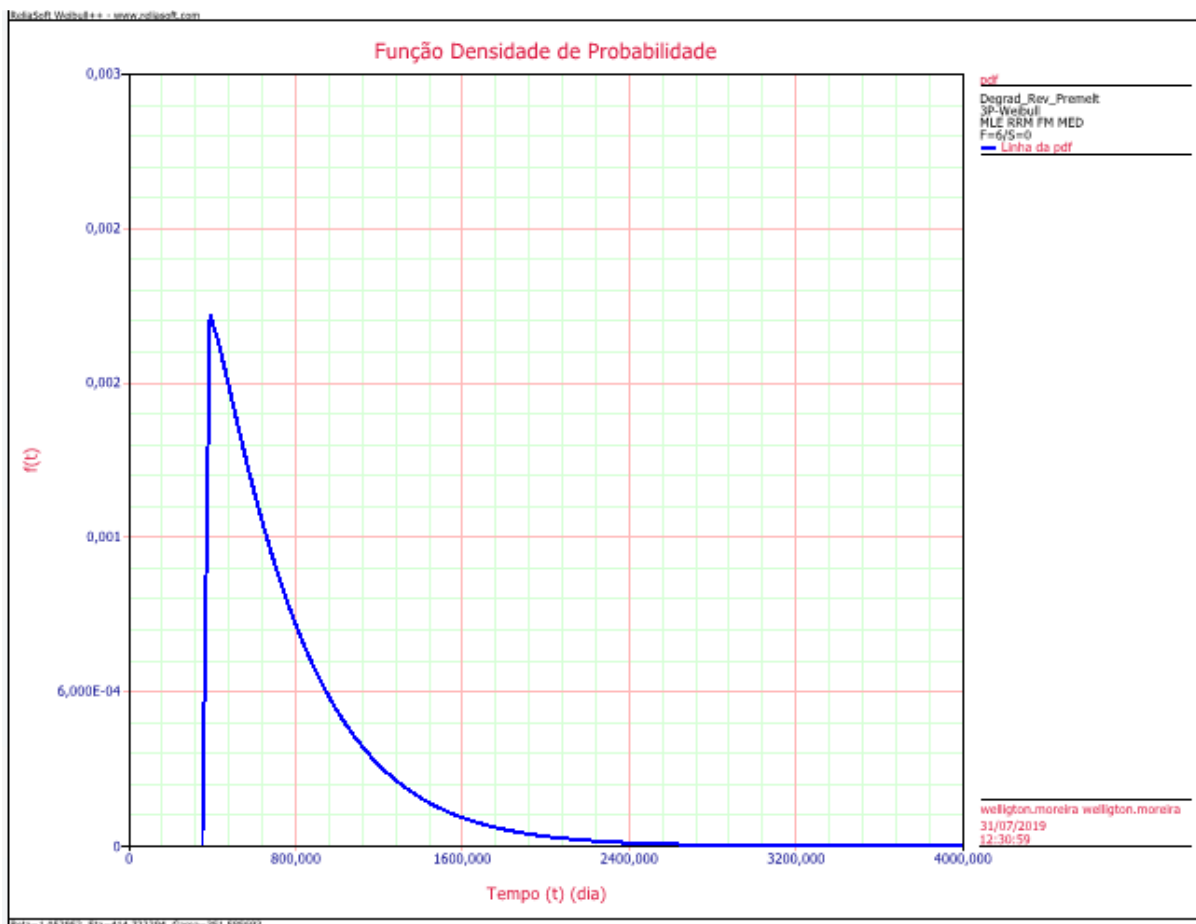


Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

Como já evidenciava os resultados dos tempos de falha extrapolados, os dados de degradação da campanha 2 são os que apresentam tendência de atingir o nível de degradação crítica mais rapidamente, enquanto os dados da campanha 4 revelam uma tendência tardia de atingir a degradação crítica.

A seguir, são apresentados gráficos relativos à análise dados de vida.

A função Densidade de Probabilidade (*pdf*) é mostrada na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Função Densidade de Probabilidade  $pdf$  ou  $f(t)$ 

Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

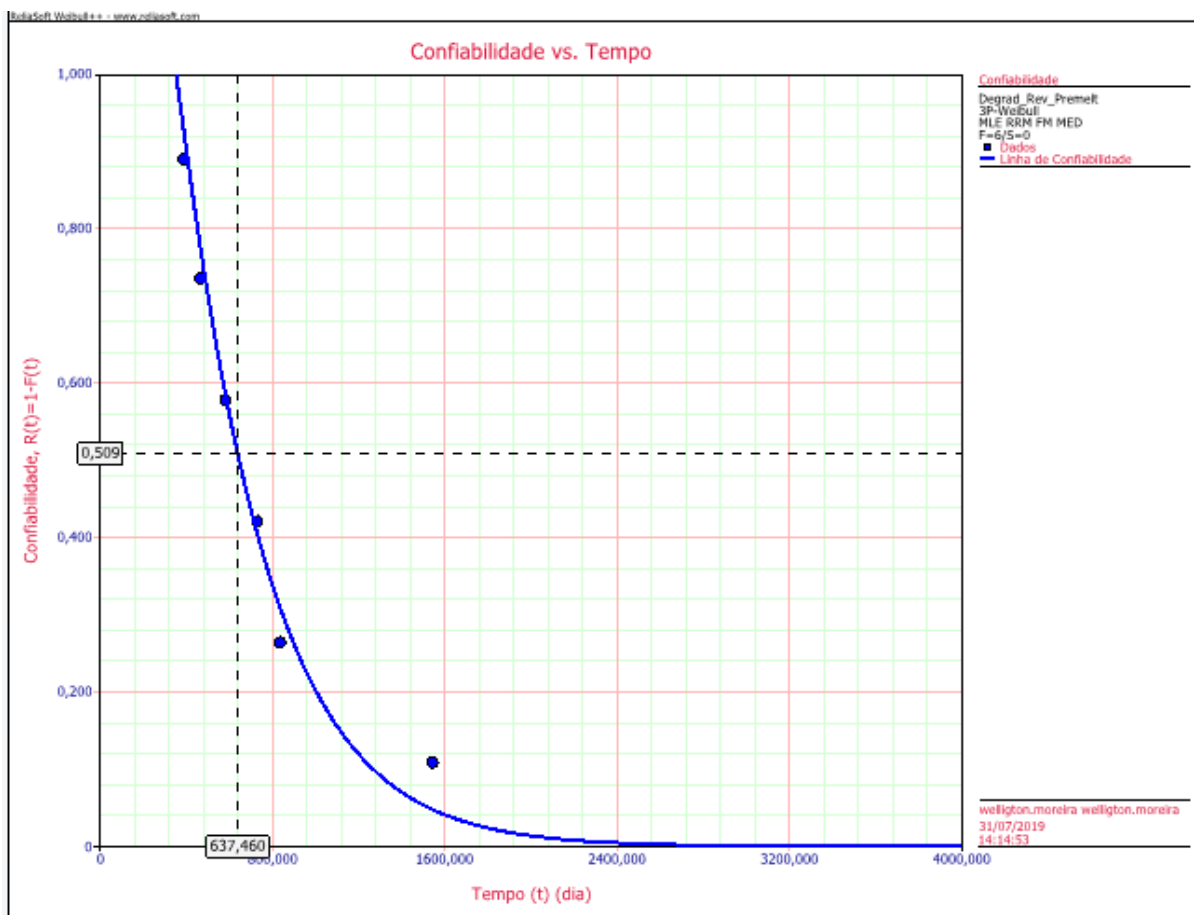
A Função Densidade de Probabilidade representa a frequência relativa de tempos de falha como uma função do tempo. Os tempos de falha extrapolados resultantes do Modelo de Degradação, conforme relatório de Relatório de Tempos Extrapolados de Falha mostrado na Figura 4.8, se concentraram entre 387 e 1544 dias. É o que se observa na curva  $pdf$  acima, onde o pico de probabilidades se concentra neste intervalo de tempo.

Outra curva de grande interesse na análise de dados de vida é a da Confiabilidade  $R(t)$ .

A função de Confiabilidade fornece a probabilidade de sucesso de uma determinada unidade, equipamento ou sistema desempenhar uma missão dentro de um tempo determinado, sendo a mesma expressa em valores entre 0 e 1, ou seja, 0 a 100% de Confiabilidade.

A Figura 4.12 representa a curva de confiabilidade para o forno em estudo.

Figura 4.12 – Curva de Confiabilidade x Tempo



Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

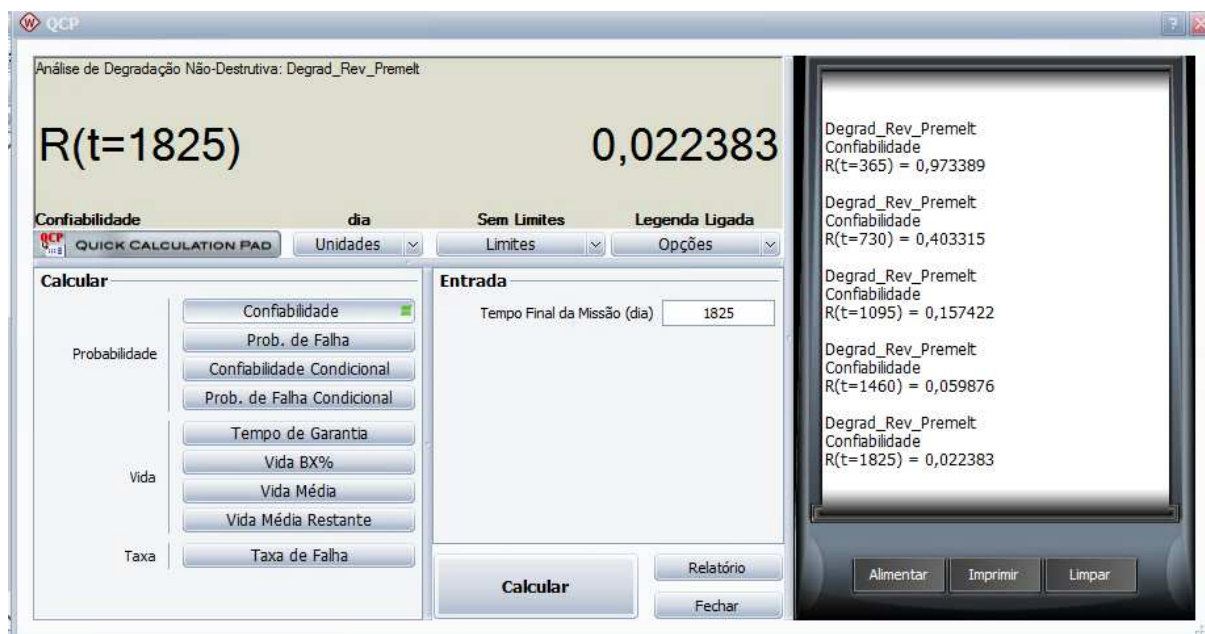
Observa-se que a confiabilidade da instalação decai continuamente no tempo, uma vez mantida a tendência apresentada pelos dados de degradação coletados.

Analisando esta curva em conjunto com os cálculos de confiabilidade fornecidos pelo QCP (*Quick Calculation Pad*), é possível obter uma visão geral da confiabilidade do forno Premelt com relação à degradação do seu revestimento refratário.

A Figura 4.13 apresenta os valores de confiabilidade anualmente, por um período de 5 anos, a contar do dia 20 de agosto de 2018, data de reinício de operação do forno após a troca do revestimento refratário:

- a) Confiabilidade após 1 ano de operação = 0,973389 = 97,33%.
- b) Confiabilidade após 2 anos de operação = 0,403315 = 40,33%.
- c) Confiabilidade após 3 anos de operação = 0,157422 = 15,74%.
- d) Confiabilidade após 4 anos de operação = 0,059876 = 5,98%.
- e) Confiabilidade após 5 anos de operação = 0,022383 = 2,23%.

Figura 4.13 – Cálculo da Confiabilidade para 5 Anos de Operação



Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

Estes valores mostram uma queda abrupta na confiabilidade de 97,33% para 40,33% entre o primeiro e o segundo ano de operação. Portanto, a instalação tornar-se-á extremamente comprometida, uma vez mantida a tendência apresentada pelos dados de degradação coletados. A confiabilidade ao final de 5 anos, período considerado razoável para a utilização do referido forno sem a necessidade de substituir o revestimento refratário, é de apenas 2,23%.

Outra métrica concernente à vida da instalação é a Vida Média, frequentemente referida como MMTF (*Mean Time To Failure*). Esta representa o tempo médio que se espera que a unidade opere normalmente antes de falhar.

A Figura 4.14 mostra o valor de MMTF (*Mean Time To Failure*) para o forno Premelt. Um MTBF de 757 dias corresponde a aproximadamente 2 anos de operação. Figura 4.14 – Vida Média (MTBF) do Forno Premelt.

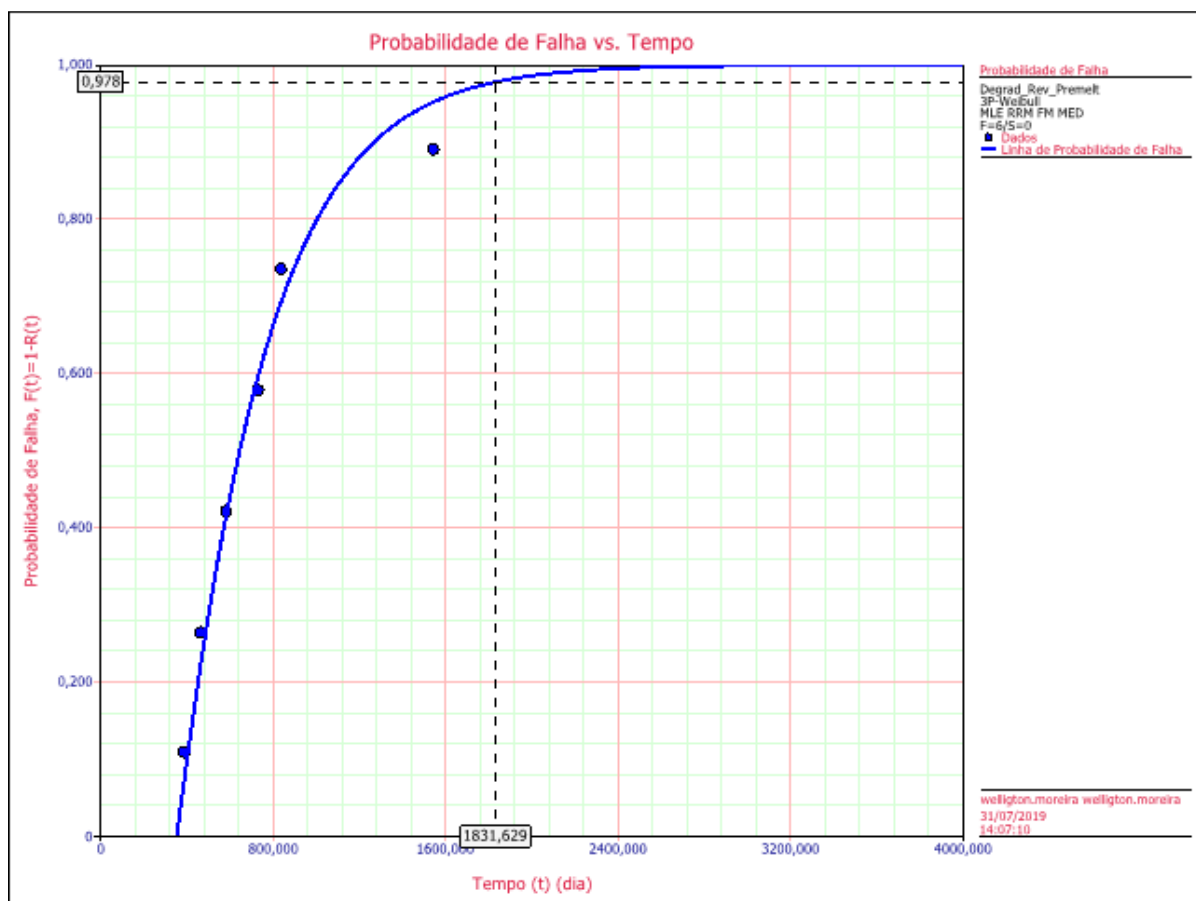


Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

A métrica recíproca da Confiabilidade é a Probabilidade de Falha, também conhecida como “não-confiabilidade”, que representa a probabilidade de uma unidade, equipamento ou sistema apresentar falha num tempo específico.

A curva de Probabilidade de Falha da instalação é mostrada na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Curva de Probabilidade de Falha x Tempo



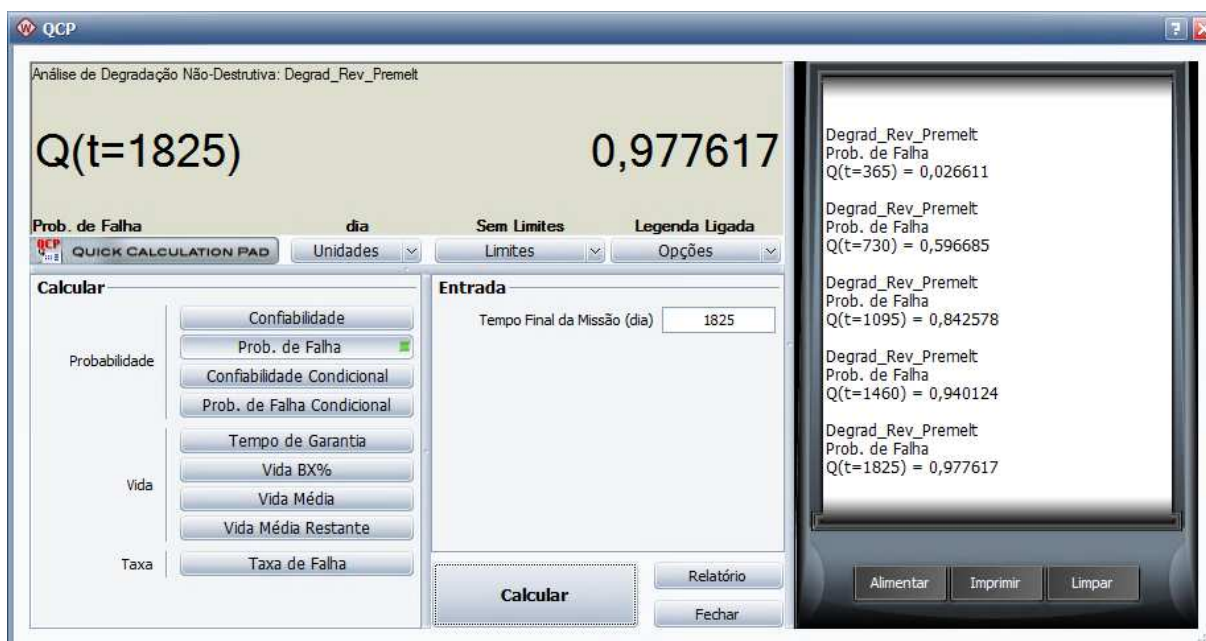
Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

A Figura 4.16 apresenta os resultados de Probabilidade de Falha anualmente, para um período de cinco anos, a contar do dia 20 de agosto de 2018, data de reinício de operação do forno após a troca do revestimento refratário:

- Probabilidade de Falha após 1 ano de operação = 0,026611 = 2,66%.
- Probabilidade de Falha após 2 anos de operação = 0,596685 = 59,66%.
- Probabilidade de Falha após 3 anos de operação = 0,842578 = 84,25%.
- Probabilidade de Falha após 4 anos de operação = 0,940124 = 94,01%.
- Probabilidade de Falha após 5 anos de operação = 0,977617 = 97,76%.



Figura 4.16 – Cálculo da Probabilidade de Falha para 5 Anos de Operação



Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

Outra importante métrica obtida através da Análise de Dados de Vida é a função Taxa de Falha. Esta função permite a determinação do número de falhas que ocorrem por unidade de tempo. Como o resultado desta função denota a taxa de falha instantânea, ela é também conhecida como “função de risco”.

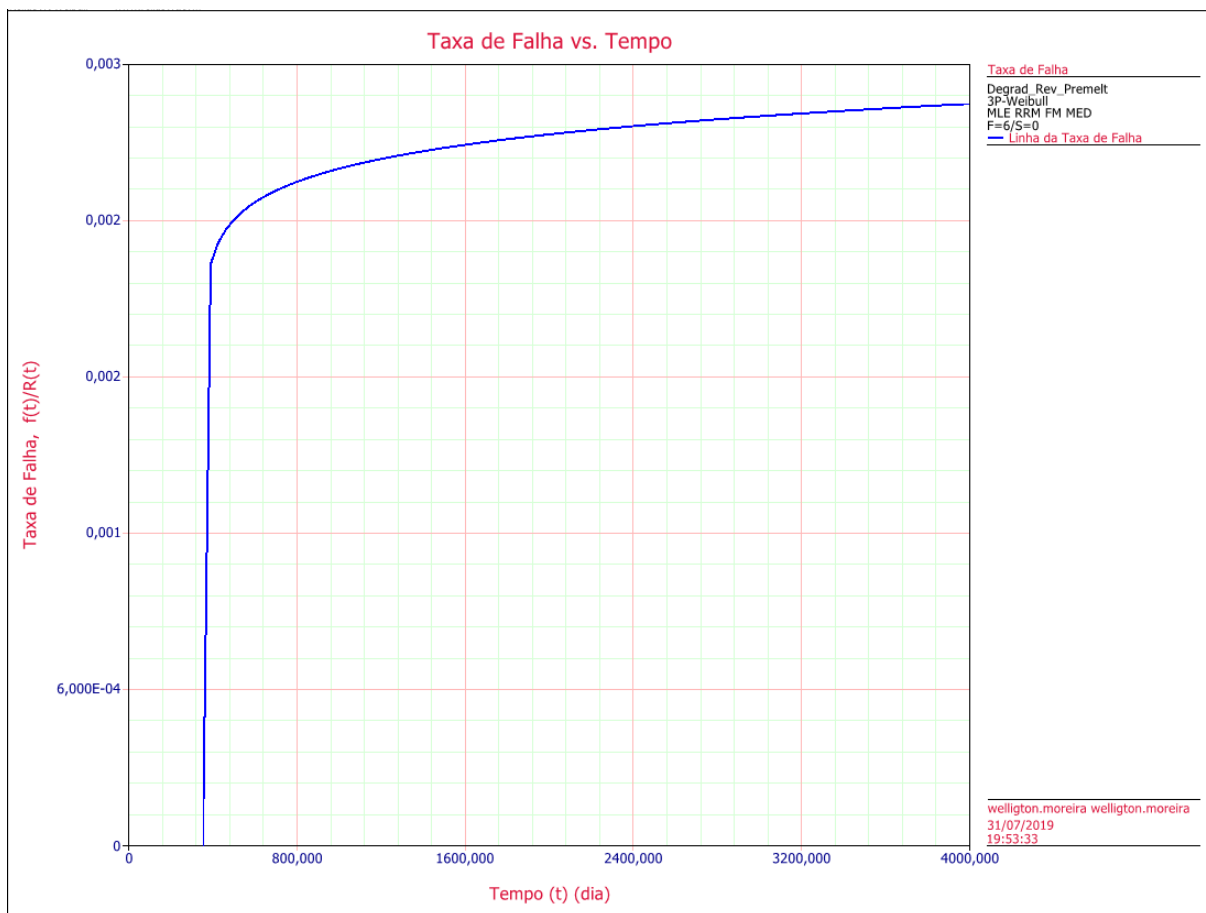
A curva de Taxa de Falha da instalação é mostrada na Figura 4.17.

O Cálculo da Taxa de Falha para um período de cinco anos, a contar do dia 20 de agosto de 2018, data de reinício de operação do forno após a troca do revestimento refratário, resulta nos valores abaixo:

- Taxa de Falha após 1 ano de operação = 0,002117 falhas por dia.
- Taxa de Falha após 2 anos de operação = 0,002527 falhas por dia.
- Taxa de Falha após 3 anos de operação = 0,002619 falhas por dia.
- Taxa de Falha após 4 anos de operação = 0,002675 falhas por dia.
- Taxa de Falha após 5 anos de operação = 0,002715 falhas por dia.

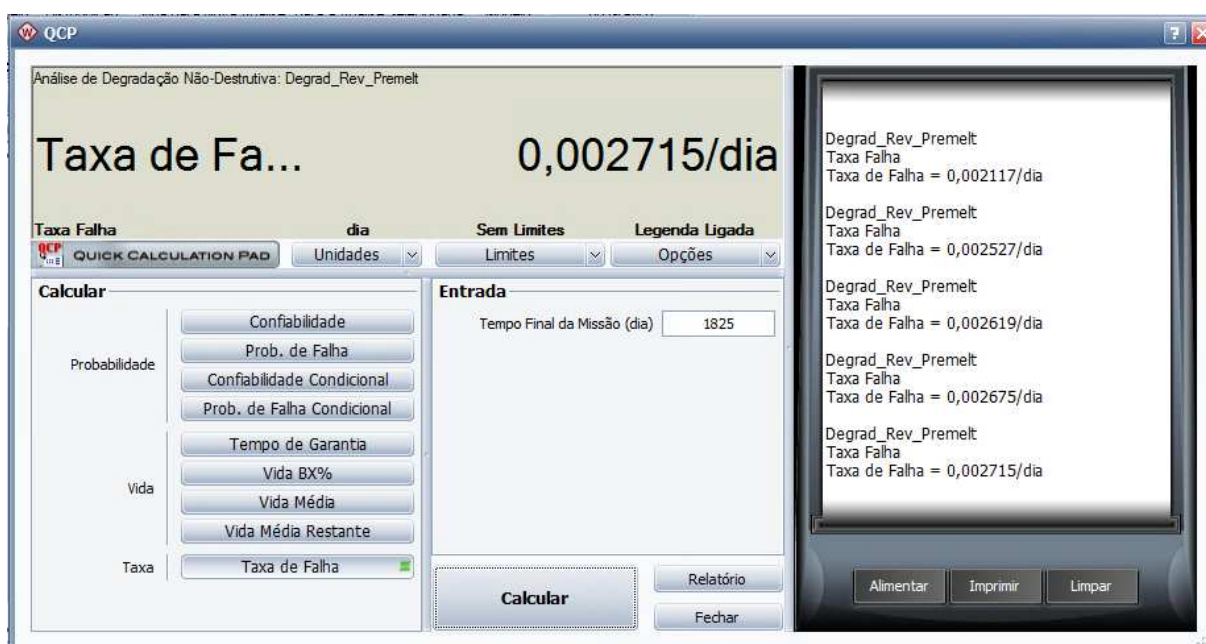
Estes valores calculados são apresentados na Figura 4.18.

Figura 4.17 – Curva de Taxa de Falha x Tempo



Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

Figura 4.18 – Cálculo da Taxa de Falha para 5 Anos de Operação



Fonte: Software Weibull++ Reliasoft (2019).

Estes valores comprovam que a Taxa de falha, como esperado, é crescente com o tempo, o que demonstra uma tendência contínua de deterioração do revestimento refratário.

Outras métricas de Confiabilidade, tais como a Confiabilidade Condicional, a Probabilidade de Falha Condicional, o Tempo de Garantia, a Vida BX% e a Vida Média Restante também são possíveis de serem obtidas, mas não serão abordadas no presente trabalho por não estarem relacionadas aos objetivos propostos na análise.

#### 4.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi realizado um estudo de caso de forma a aplicar os conceitos de Engenharia da Confiabilidade, e de forma particular os conceitos e técnicas relacionados às análises de degradação, tendo sido possível constatar a grande utilidade destas ferramentas para os profissionais que lidam com a manutenção e gestão de ativos.

Através da análise de degradação não destrutiva aplicada a um forno de indução *coreless*, foi possível construir um modelo que representasse o estado do revestimento refratário do forno, a partir de valores medidos da corrente da bobina e assim extrapolar estes dados para predizer a condição futura da instalação, em termos de confiabilidade.

À medida que este modelo for aprimorado, espera-se que a parada do forno para troca do revestimento refratário seja realizada de forma planejada, antes que um nível crítico de degradação seja atingido, causando a parada repentina do forno.

O Capítulo 5 apresentará a síntese dos resultados deste trabalho, as dificuldades encontradas, as conclusões resultantes, bem como as sugestões para trabalhos futuros, visando ao aperfeiçoamento e a extensão do presente modelo para os demais fornos de aquecimento de metal líquido da ArcelorMittal Vega.

## 5 CONCLUSÃO

A metodologia apresentada neste trabalho pretende mostrar como a teoria de análise de degradação pode ser aplicada a ativos críticos onde um parâmetro de degradação pode ser medido e como a manutenção destes ativos pode ser otimizada com o uso adequado das ferramentas da Engenharia de Confiabilidade.

Foram descritos todos os passos para executar esta metodologia e um exemplo demonstrativo envolvendo a análise de degradação de um forno de indução *coreless* foi realizado.

A implantação massiva destas análises de confiabilidade em um ambiente industrial somente será possível com uma mudança de cultura através da disseminação da Engenharia de Confiabilidade para os diferentes níveis da organização.

### 5.1 SÍNTESE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES RESULTANTES

Como resultados do presente trabalho, destaca-se a fundamentação teórica dos princípios de funcionamento dos fornos de indução, bem como dos processos que levam à degradação do revestimento refratário destes fornos, particularmente de fornos *coreless*. Esta fundamentação será de grande importância na implantação das ações de desdobramento do plano de confiabilidade destes equipamentos.

Quanto aos resultados quantitativos, a obtenção dos tempos de falha extrapolados se mostra relevante, pois permite a tomada de ações antecipadas, visando à contenção desta degradação ou mesmo um planejamento para uma futura troca do revestimento refratário. O valor de MTBF de 757 dias (aproximadamente 2 anos) é forte um indicativo de que, a se manter os níveis atuais de degradação, o forno tem alta probabilidade de falhar dentro dos próximos 2 anos. Este valor de MTBF também se mostra bem coerente com o MTBF calculado de 2 anos e 8 meses (aproximadamente 970 dias) nos últimos 9 anos, desde o comissionamento do forno.

Outro resultado quantitativo de forte interesse é o valor da confiabilidade calculada para a instalação. A quantificação da confiabilidade tem um significado específico, ao mostrar que entre o primeiro e o segundo ano de operação do forno após a troca do revestimento refratário, a confiabilidade decai de 97,33% para 40,33%

e entre o segundo e terceiro ano esta atinge o valor de 15,74%, revelando o quão intenso é o desgaste do revestimento refratário nos dois primeiros anos após o reinício de operação do forno.

É também relevante o significado mais geral da quantificação da confiabilidade, pois mostra que atualmente, com o uso adequado das ferramentas de engenharia da confiabilidade, a probabilidade e a capacidade de componentes, ativos e sistemas executarem suas funções necessárias por períodos desejados e condições especificadas, podem ser previstas, projetadas, testadas e demonstradas. Isto significa um grande avanço comparando às abordagens que exprimem a confiabilidade em termos puramente qualitativos.

## 5.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS E SOLUÇÕES

Dentre as dificuldades encontradas, podem ser citadas:

- a) A dificuldade de encontrar fundamentação teórica que comprovasse a relação entre o desgaste do revestimento refratário e a queda da corrente da bobina primária do forno. Mesmo consultando especialistas no Brasil tanto de empresas de fabricação de refratários como de empresas fabricantes de fornos, houve conclusões discordantes, evidenciando que mesmo profissionais diretamente implicados com este tipo de equipamento desconhecem esta relação. A confirmação foi obtida através de estudos técnicos especializados, tais como o guia técnico "*Efficient melting in coreless induction furnaces*," *GOOD PRACTICE GUIDE No. 50*", elaborado no ano 2000 pelo Governo do Reino Unido como parte do programa "*Energy Efficiency Best Practice Programme*".
- b) Embora tenha sido encontrada uma vasta produção de artigos técnicos e estudos acadêmicos sobre fornos de indução *coreless*, muitos deles abordando os problemas de desgaste do revestimento de refratário e a formação de *buidup*, todos estes artigos e estudos eram voltados para fornos aplicados na fundição tradicional de materiais ferrosos. Pouca ou quase nenhuma abordagem era feita com relação ao uso destes fornos para fusão e/ou aquecimento de ligas não-

ferrosas, que é o caso do forno objeto desta análise, cujo banho metálico é composto de uma liga de Alumínio-Zinco. Como a composição do banho tem pouco efeito no desgaste do revestimento refratário, este não teve maior impacto na análise, mas será de grande importância em análises futuras que considerem a influência da formação de depósitos de partículas de óxidos (*buildup*) e outras impurezas nos valores de corrente da bobina do forno.

- c) Uma análise de degradação, assim como outras análises pertinentes ao estudo da confiabilidade de ativos, requer uma grande quantidade de dados, para que os resultados sejam o mais preciso e coerentes possíveis. Para o estudo em questão, não haviam dados disponíveis de corrente da bobina do forno Premelt anteriores a 20 de abril de 2019, o que limitou a análise a um período relativamente curto e recente de operação do forno. A inexistência de dados anteriores, sobretudo dos dados relativos às falhas ocorridas em agosto de 2016, dezembro de 2017 e junho de 2018, as quais tornaram o forno inoperante e levaram à substituição do revestimento refratário, foi solucionada com a análise individualizada das campanhas de produção de material Galvalume®, quando o forno é efetivamente utilizado e submetido às condições máximas de trabalho, intensificando o processo de desgaste.

### 5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A aplicação deste estudo de caso possibilitou a identificação de novas possibilidades de pesquisas, de modo a proporcionar melhores resultados de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade. Estas possibilidades são mostradas a seguir:

- a) Dar continuidade à presente análise de degradação, registrando os dados de corrente da bobina do forno para todas as campanhas futuras, de forma a atualizar os resultados atuais e comprovar, entre outros, se o modelo de degradação e de distribuição selecionados para o conjunto de dados, e, por conseguinte os tempos extrapolados de falha, se mantêm.

- b) Verificar outros fatores, tais como a formação de depósitos de partículas de óxidos (*buildup*) e outras impurezas, que também devam ser considerados como modificadores do comportamento da corrente do forno, uma vez que se sabe através de observações anteriores que a taxa de decrescimento diminui ao longo do tempo, com a corrente tendendo a se estabilizar, após um período de crescente diminuição.
- c) Aplicar o modelo e os conceitos apreendidos nesta análise de degradação para os fornos a canal da ArcelorMittal Vega, cujos efeitos financeiros da perda de indutores por entupimento de canais são bem mais relevantes que as falhas apresentadas pelo forno *coreless*. Para tanto, será necessária a aquisição e preparação de dados mensuráveis que permitam estabelecer uma relação direta com o entupimento dos canais.

A implantação das sugestões de novos trabalhos permitirá que se atinja um novo patamar de conhecimento e utilização de ferramentas avançadas de confiabilidade, as quais têm enorme potencial para alavancar melhores resultados na manutenção e gestão de ativos críticos, de forma a garantir a continuidade operacional do negócio.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR-5462 Confiabilidade e Manutenibilidade – Terminologia**. ABNT/CB-03 – Eletricidade, 1994.

EFICIENT MELTING IN CORELESS INDUCTION FURNACES: GOOD PRACTICE GUIDE No. 50. ETSU, Harwell, Didcot, Oxfordshire. 2000. Disponível em: <[https://lists.man.lodz.pl/pipermail/odlew-pl/2012/10/att-0003/guide\\_coreless\\_induction\\_furnaces.pdf](https://lists.man.lodz.pl/pipermail/odlew-pl/2012/10/att-0003/guide_coreless_induction_furnaces.pdf)>. Acesso em: 30/05/2019.

INDUCTION FOUNDRY SAFETY FUNDAMENTALS GUIDE. Bulletin: M2567 Rev. 2. Inductotherm Corp. 2008. Disponível em: <<https://code.inductotherm.com/06%20Resources/Safety/M2567%20Rev%203%20091511.pdf>>. Acesso em: 02/06/2019.

MARIANO, Carlos Henrique; RIGONI, Emerson: Aspectos Gerais e Definições de Confiabilidade. **LDA (Material Didático)**. Curitiba, PR. 2018. Não Paginado.

MARTINS, Ricardo João Carolino. **Análise da degradação mecânica de ativos físicos**. 2017. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Área Departamental de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.21/7969>>. Acesso em: 30/06/2019.

NARO, R. L.; WILLIAMS, D. C; SATRE, P. **Economic Consequences of Insoluble Buildup on Coreless Melting Efficiency**. Foundry Management & Technology. Jan 01, 2019. Disponível em: <<https://www.foundrymag.com/meltpour/economic-consequences-insoluble-buildup-coreless-melting-efficiency>>. Acesso em: 30/06/2019.

RELIASOFT.COM. **Degradation data analysis**. 2019. Disponível em: <<https://www.reliasoft.com/products/reliability-analysis/weibull/degradation-data-analysis-example>>. Acesso em: 04/05/2019.

RELIAWIKI.ORG. **Introduction to Life Data Analysis**. 2011a. Disponível em: <[http://reliawiki.org/index.php/Introduction\\_to\\_Life\\_Data\\_Analysis](http://reliawiki.org/index.php/Introduction_to_Life_Data_Analysis)>. Acesso em: 04/05/2019.

RELIAWIKI.ORG. **Basic Statistical Background**. 2011b. Disponível em: <[http://reliawiki.org/index.php/Basic\\_Statistical\\_Background](http://reliawiki.org/index.php/Basic_Statistical_Background)>. Acesso em: 04/05/2019.

RELIAWIKI.ORG. **Life Distributions**. 2011c. Disponível em: <[http://reliawiki.org/index.php/Life\\_Distributions](http://reliawiki.org/index.php/Life_Distributions)>. Acesso em: 04/05/2019.

RELIAWIKI.ORG. **The Weibull Distribution**. 2011d. Disponível em: <[http://reliawiki.org/index.php/The\\_Weibull\\_Distribution](http://reliawiki.org/index.php/The_Weibull_Distribution)>. Acesso em: 04/05/2019.



RELIAWIKI.ORG. **Life Data Classification**. 2011e. Disponível em: <[http://reliawiki.org/index.php/Life\\_Data\\_Classification](http://reliawiki.org/index.php/Life_Data_Classification)>. Acesso em: 04/05/2019.

RELIAWIKI.ORG. **Degradation Data Analysis**. 2011f. Disponível em: <[http://reliawiki.org/index.php/Degradation\\_Data\\_Analysis](http://reliawiki.org/index.php/Degradation_Data_Analysis)>. Acesso em: 04/05/2019.

SYNTHESISPLATFORM.NET. **Weibull++ Degradation Analysis Folio**. 1992a. Disponível em: <[http://help.synthesisplatform.net/weibull\\_alta8/weibull\\_degradation\\_analysis\\_folio.htm#Degradation\\_Folio\\_Data\\_Sheet](http://help.synthesisplatform.net/weibull_alta8/weibull_degradation_analysis_folio.htm#Degradation_Folio_Data_Sheet)>. Acesso em: 04/05/2019.

SYNTHESISPLATFORM.NET. **Degradation Model Wizard**. 1992b. Disponível em: <[http://help.synthesisplatform.net/weibull\\_alta8/degradation\\_model\\_wizard.htm](http://help.synthesisplatform.net/weibull_alta8/degradation_model_wizard.htm)>. Acesso em: 04/05/2019.

VEGA, ARCELORMITTAL - Disponível em: <<http://vega.arcelormittal.com>>. Acesso em: 05/08/2019.

WEIBULL.COM. **Destructive Degradation Analysis in Weibull++**. 2015. Disponível em: <<https://www.weibull.com/hotwire/issue178/hottopics178.htm>>. Acesso em: 04/05/2019.

WEIBULL.COM. **Degradation Analysis in Destructive Testing**. 2008. Disponível em: <<https://www.weibull.com/hotwire/issue85/hottopics85.htm>>. Acesso em: 04/05/2019.