

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

MÁRCIO DE SOUZA LANA

**CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE DO RESFRIADOR DE SÍNER
DA ÁREA DA SINTERIZAÇÃO DE UMA USINA SIDERÚRGICA
INTEGRADA**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**VITÓRIA
2017**

MÁRCIO DE SOUZA LANA

**CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE DO RESFRIADOR DE SÍNER
DA ÁREA DA SINTERIZAÇÃO DE UMA USINA SIDERÚRGICA
INTEGRADA**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues

Co-orientador: Prof. Dr. Emerson Rigoni

VITÓRIA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE DO RESFRIADOR DE SINTER DA ÁREA DA SINTERIZAÇÃO DE UMA SIDERÚRGICA INTEGRADA

por

MÁRCIO DE SOUZA LANA

Esta monografia foi apresentada em 16 de outubro de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
Professor Orientador - UTFPR

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

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Membro Titular da Banca - UTFPR

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fazem parte da minha vida e que merecem a oportunidade desses agradecimentos. Portanto, àquelas que não estão presentes entre essas palavras, tenha a certeza que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço em especial a minha esposa Nádia e aos meus filhos Lara e Bernardo que se confortaram com minha ausência, nos tempos de estudos, e sempre me deu energia e inspiração para continuar.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Rodrigues, pela clareza na exposição de seus comentários conduzindo e orientando o estudo na busca do melhor resultado.

Agradeço aos meus colegas de sala pelo companheirismo e disposição.

Agradeço à empresa e a UFPR que juntas proporcionaram um ambiente com estrutura de qualidade e profissionais professores Doutores, que dedicam o tempo motivado a ensinar e a aprender. Obrigado.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste estudo.

RESUMO

LANA, Márcio de Souza. **Crescimento da confiabilidade do Resfriador de Sínter da Usina Siderúrgica Integrada.** 2017. Número total de folhas 42. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

No contexto atual, os estudos de engenharia de confiabilidade tornaram-se cada vez mais essencial para a maior disponibilidade das plantas, a estabilidade operacional e a busca do menor custo de manutenção de seus ativos físicos. Após implantação da nova filosofia de manutenção centrada em confiabilidade (MCC), e, as melhorias implantadas no projeto original do equipamento Resfriador de sínter, esse estudo se fez necessário para verificar se houve crescimento da confiabilidade do equipamento. Portanto, através do método de análise do crescimento da confiabilidade com a utilização da ferramenta RGA da *Reliasoft* utilizando o modelo Duane, foi possível confirmar o crescimento da confiabilidade por meio da avaliação dos parâmetros alpha (α) e beta (β) que apresentam valores entre zero e um. O crescimento da confiabilidade foi de 45%.

Palavras-chave: Confiabilidade, Duane, RGA e MCC.

ABSTRACT

LANA, Márcio de Souza. Increase in the reliability of the Sinter Cooler. Total number of sheets 42. Monograph (Specialization in Reliability Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Currently, reliability engineering studies have become increasingly essential for greater plant availability, operational stability and the pursuit for lower maintenance cost and their physical assets. After the implementation of the new RCM reliability centered maintenance philosophy, and the improvements implemented in the original design of the Sinter cooler equipment, this study was necessary to estimate the growth of the reliability of the equipment. Therefore, through the reliability growth analysis method using the RGA tool of the Reliasoft software using the Duane model, it was possible to confirm the growth of the reliability through the evaluation of the alpha (α) and beta (β) parameters that have values between zero and one. The reliability growth was 45%.

Key words: Reliability,

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Gráfico de Falhas - Paradas por falhas da Máquina de Sinterização.....	10
Figura 2.1: Fluxograma do processo siderúrgico integrado à produção de aço	13
Figura 2.2: Alto Forno – Esquema de um Alto Forno de redução contracorrente	14
Figura 2.3: Representação do processo de Sinterização	17
Figura 2.4: Esquema simplificado do processo de sinterização	18
Figura 2.5: Resfriador Anular – Ilustração de um equipamento resfriador anular	20
Figura 2.6: Resfriador – Esquema ilustrativo do resfriamento da massa de sinter no carro do Resfriador.....	21
Figura 2.7: Resfriador – Esquema ilustrativo da abertura do fundo do carro do Resfriador para descarregar o sinter frio.....	22
Figura 3.1: Plano de Duane – Gráfico demonstrando o crescimento da confiabilidade em sistema reparáveis (testa – encontra- corrige)	23
Figura 3.2: Gráfico Logaritmo – Gráfico plotado em escala logarítmica do tempo médio entre falhas versus o tempo acumulado	25
Figura 4.1: Imagem do Reliasoft RGA com as simulações de MTBF e quantidade de falhas esperadas no tempo de 12.174 horas	34
Figura 5.1: Desenho técnico da modificação da fixação do trilho de apoio e borracha amortecedora	37
Figura 5.2: Redução da taxa de falhas ao longo do tempo do equipamento Resfriador.....	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Crescimento do MTBF vs Tempo do sistema Reliasoft RGA do equipamento Resfriador	33
Gráfico 4.2: Redução da taxa de falhas ao longo do tempo do equipamento Resfriador.....	33
Gráfico 4.3: Gráficos de paradas não planejadas da Máquina de Sinterização	35
Gráfico 5.1: Redução da taxa de falhas ao longo do tempo do equipamento Resfriador.....	36
Gráfico 5.2: Gráfico expandido da redução da taxa de falhas ao longo do tempo do equipamento Resfriador	39
Gráfico 5.3: Taxa de falhas não programadas da Máquina de Sinterização após implantação das melhorias no Resfriador	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Exemplo do levantamento de dados de falhas acumulados no tempo de um sistema complexo.....	27
Tabela 4.1: Dados de falhas e MTBF acumulado estruturado conforme modelo de Duane.....	30

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Referência de valores de alpha (α) para diferentes sistemas.....	26
Quadro 4.1: Critérios para organização dos dados de falhas conforme modelo Duane	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	OBJETIVOS	10
1.1.1	OBJETIVOS GERAL	10
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.2	JUSTIFICATIVA	11
1.3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	12
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2	PROCESSO SIDERÚRGICO	13
2.1	SINTERIZAÇÃO	15
2.1.1	Recebimento e Transformação	16
2.1.2	Importância do sinter na Carga Metálica do Alto Forno	18
2.2	RESFRIADOR DE SÍNTER	19
2.2.1	Princípio de Funcionamento.....	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
3.1	O EXPERIMENTO DE DUANE	24
3.2	ESTRUTURA DUANE PARA SISTEMAS COMPLEXOS.....	27
4	DESENVOLVIMENTO	29
4.1	ESTRUTURA DOS DADOS	29
4.2	RESULTADOS	32
4.2.1	Gráficos MTBF e Intensidade de Falhas no tempo	32
4.2.2	Análise dos Resultados	35
5	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

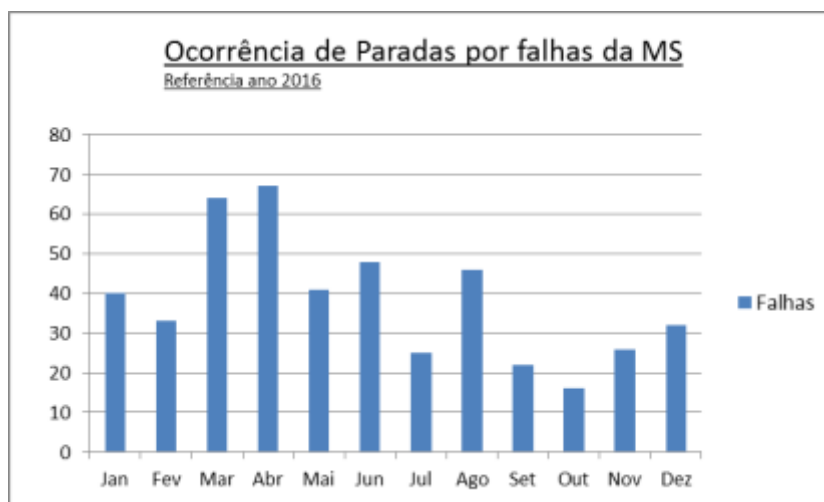
A unidade siderúrgica é a maior produtora de aços planos do país, ocupando a liderança no mercado de produção de aço em relação ao volume de produção e volume de vendas. O grupo siderúrgico tem a consciência que no mundo de hoje, altamente competitivo, temos que desenvolver a todo o momento. E, através de novas ideias e formas de operar nossas unidades produtivas sustentar essa posição de maior e melhor fornecedor de aço. Ser cada vez mais competitivo sempre na busca da prosperidade acompanhando a evolução mundial e atuando com respeito e transparência com a sociedade.

A unidade é uma usina siderúrgica integrada localizada na Região Metropolitana da Grande Vitória no estado do Espírito Santo, região Sudeste do Brasil. Essa é a unidade de maior capacidade de produção instalada que juntamente com uma unidade no sul do país, atendem o mercado produzindo placas, bobinas a quente, laminados a frio e galvanizados. Sua localização e o complexo logístico à sua volta favorece o recebimento de insumos e matérias primas e o despacho de produtos para atendimento ao mercado interno e externo.

A unidade possui na área da Sinterização uma Máquina de Sinterização para atender ao abastecimento dos silos dos três Altos Fornos de redução. Desta forma, paradas não planejadas causam variabilidade no processo de abastecimento da carga metálica nos altos fornos e conseqüentemente aumento dos custos de produção do aço gusa.

Na área da Sinterização o equipamento Resfriador de sinter apresentava o maior índice de falhas afetando diretamente o UMSR (*Unplanned Maintenance Stoppage Ratio*) da Máquina de Sinterização, e, com isso, o abastecimento dos silos dos Altos Fornos era realizado com sinter estocado do pátio de minério, modificando assim a qualidade física e química da matéria prima. Vide Figura 1.1.

Figura 1.1: Gráfico de Falhas - Paradas por falhas da Máquina de Sinterização



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2017).

Diante do desafio de aumentar a disponibilidade da área da Sinterização, realizou-se um trabalho de confiabilidade para identificação dos “gargalos” do processo, sendo o equipamento Resfriador apresentou-se como o de maior impacto na indisponibilidade da planta. E, a partir desse trabalho foram definidas paradas planejadas para atuação de manutenção e implantação de melhorias conforme plano de ações 5W2H, orçamento anual da manutenção e plano de produção de síter.

Após a conclusão das ações do Plano de Ações do Resfriador, a proposta desse estudo é verificar se houve crescimento da confiabilidade do equipamento com base na aplicação de ferramentas de análise do RGA do *software Reliasoft* analisando os resultados dos parâmetros de forma α e β conforme sua interpretação no modelo de Duane.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVOS GERAL

Avaliar o crescimento da confiabilidade do equipamento resfriador de síter após implantação de melhorias no projeto original e estabilização das taxas de falhas do equipamento.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o atendimento ao objetivo do trabalho, o estudo será composto pela seguinte sequência de atividades:

- Definir o tamanho da amostra: o estudo será realizado com base nos dados de falhas do período de 08 de abril de 2016 a 27 de julho de 2017. As falhas ocorridas nesse período serão estratificadas e organizadas conforme necessidade do modelo de análise do crescimento da confiabilidade;
- Coletar os dados: a base de dados para a pesquisa quantitativa será elaborada através do levantamento do histórico de paradas por falhas da Máquina de Sinterização disponíveis no Sistema de Manutenção nível 2 Aspentch;
- Selecionar o modelo estatístico para análise do crescimento da confiabilidade com base nas informações e dados da amostra;
- Analisar o MTBF (*Mean Time Between Failures*) e a evolução ao longo do tempo. O MTBF instantâneo é dado por: $(\lambda \beta t^{\beta - 1})^{-1}$. Onde $\lambda > 0$, $\beta > 0$, e se $\beta < 1$ o item está sob Crescimento.
- Acompanhar a performance do equipamento após a implantação das modificações do projeto, verificar uma situação real com o objetivo de aprofundar nas causas raízes e na melhoria contínua do projeto. Estar no local em que o problema ocorreu possibilitará uma visão particular, além da obtenção de importantes informações adicionais que solidifica e fundamenta o processo decisivo de um reprojeto.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Resfriador de Sínter impacta significativamente nas paradas por falhas da Máquina de Sinterização, com isso, um plano de ações robusto foi elaborado para atuação no Resfriador a fim de reduzir em 50% no índice de falhas da Máquina. Dentre essas ações existem reprojeto com o propósito de aumentar a confiabilidade do equipamento Resfriador. Então, com esse estudo foi possível

verificar que as modificações no projeto original contribuíram de forma positiva para aumento da confiabilidade.

1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A verificação do possível crescimento da confiabilidade será realizada com os dados coletados do sistema de *Aspentch* versão 3.1 da unidade de Tubarão. O *software* possui comunicação direta com o sistema supervisor de produção, e, com isso todas as paradas da Máquina de Sinterização são registradas instantaneamente no tempo exato da ocorrência. Para toda parada da Máquina, o Supervisor responsável pelo turno classifica a parada e identifica a causa imediata da ocorrência.

O sistema está disponível 24 horas por dia, monitora e registra toda ocorrência de parada da Máquina e permite extrair os dados de falhas para uma planilha no Microsoft Excel, onde, será realizada a estruturação dos dados conforme necessidade do modelo estatístico de verificação do crescimento da confiabilidade. A partir dos resultados obtidos, os gráficos serão comentados a fim de extrair informações que comprovem o crescimento da confiabilidade do equipamento.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo inicial apresenta o tema do trabalho, sua delimitação, os objetivos e as justificativas para o seu desenvolvimento, bem como a definição dos métodos adotados e a sequência das atividades.

- No capítulo 2, será descrito a planta onde foi realizado o estudo, os principais equipamentos e funções.

- O capítulo 3, será apresentado o referencial teórico de engenharia de confiabilidade que norteará a pesquisa, o qual no presente estudo, é o crescimento da confiabilidade.

- O capítulo 4 consiste no desenvolvimento do trabalho, a coleta de dados de paradas por falhas da Máquina de Sinterização e o tratamento e o processamento desses dados.

- O capítulo 5 conterá a conclusão.

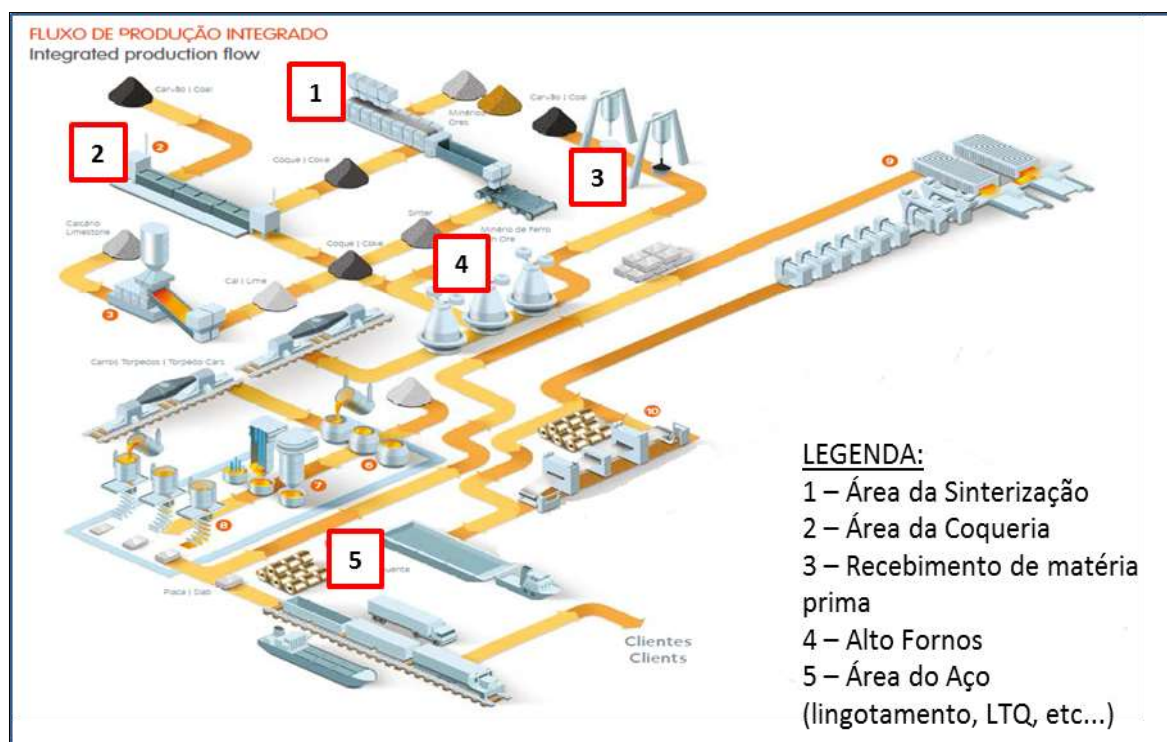
2 PROCESSO SIDERÚRGICO

No processo siderúrgico integrado ocorrem várias transformações até a obtenção do produto final. De início, acontece o recebimento e o acondicionamento do minério de ferro, do carvão e dos fundentes no pátio de minérios. A partir daí inúmeras etapas são realizadas até a obtenção do aço. Produto final da siderurgia.

Neste contexto, a unidade siderúrgica consome a maior parte desses minerais nas áreas de produtivas da Coqueria e Sinterização. Essas áreas transformam a matérias-primas em produtos chamados coque e sinter, os quais, junto a outros minerais e a pelota de minério de ferro, compõem o carregamento sólido para o abastecimento dos Altos Fornos, produzindo assim o ferro gusa - principal matéria-prima do aço (TETTI, 2004).

Na Figura 2.1 é apresentado o fluxograma de um processo siderúrgico integrado de produção de aço.

Figura 2.1: Fluxograma do processo siderúrgico integrado à produção de aço

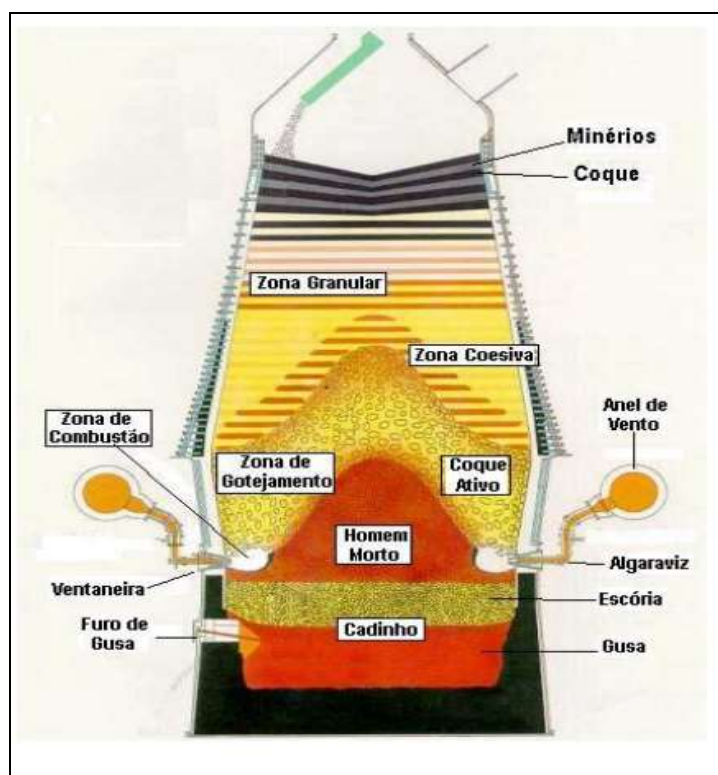


Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2016).

O abastecimento dos combustíveis sólidos (coque e carvão mineral) e da carga metálica (pelota, sínter e minério granulado) ocorre através de correias transportadoras após um processo rigoroso de classificação granulométrica. Esses produtos são acondicionados em silos, e, em seguida são dosados para compor a carga metálica do Alto Forno. A Figura 2.2 demonstra as zonas de transformação.

Os Altos Fornos são equipamentos destinados à produção do ferro gusa considerados grandes reatores químicos em contracorrente. Eles têm a forma circular metálica revestida com refratário e cerca de 30 metros de altura. O carregamento do minério de ferro, pelotas, sínter, coque ou carvão de madeira, e fundente (calcário) ocorre pelo topo de forma alternada, são aquecidos e reduzem ao contato de uma corrente ascendente de gás redutor aquecido (CO) a aproximadamente 1500°C. A transferência de calor dos gases ascendentes para os sólidos (carga metálica) que descem é acompanhada da transferência de oxigênio desses sólidos para os gases ocorrendo centenas de reações químicas (SILVA, 2011).

Figura 2.2: Alto Forno – Esquema de um Alto Forno de redução contracorrente



Fonte: Universidade de São Paulo (2012).

Os produtos das reações químicas são: o ferro-gusa, a escória e o gás BFG (*Blast Furnace Gás*). O ferro-gusa é acumulado na parte inferior do Alto Forno chamada cadinho. A extração do ferro-gusa ocorre em tempos pré-definidos conforme a produção e é transportado por carros torpedos até a unidade de produção de aço (área da Aciaria) onde serão adicionados elementos de liga com alumínio, níquel, cromo, manganês, cobre etc, conforme a necessidade de produção do aço.

A transformação do ferro-gusa em aço líquido, com a adição dos elementos de liga, dá-se a partir do sopro de oxigênio que oxida os elementos contidos no ferro-gusa e aumenta a temperatura do metal, viabilizando as reações químicas. O aço líquido passará por beneficiamentos nos refinamentos primários e secundários e será resfriado de maneira controlada nas máquinas de Lingotamento Contínuo, formando assim as placas de aço. Posteriormente o aço é laminado, bobinado e/ou conformado em chapas, vigas, arames etc. e disponibilizado para o mercado.

Dessa forma, é possível obter um entendimento resumido do processo siderúrgico a fim de identificar as principais matérias primas utilizadas para obtenção do aço e as áreas que às produzem.

2.1 SINTERIZAÇÃO

A aglomeração de finos de minérios em um produto poroso e com boas resistências físicas e químicas é desenvolvida há centenas de anos. Em 1897, T. Huntington e F. Herberlein protocolaram a patente sob um processo de ustulação de minérios de chumbo sulfetados caracterizando o primeiro ato de Sinterizar. Com o tempo, foi desenvolvida a primeira planta de Sinterização com processo de sopro contínuo em um vaso tipo panela que possuía o grelhado por baixo carregado com carvão vegetal que era acesso para início do processo de Sinterização. Nesse momento a mistura a ser sinterizada era misturada manualmente com auxílio de pás e o sopro ascendente permeava até que o material fosse totalmente sinterizado. Em seguida era basculhado em um conversor para resfriamento.

A primeira planta em escala industrial entrou em operação em 1904 desenvolvida por Carl Richard por meio do método de aglomerar os finos de minério

de ferro, pó de Alto Forno e pirita calcinada com o uso de carvão mineral (PEREIRA, 2004).

Devido à escassez do minério granulado ao longo do tempo a Máquina de Sinterização tornou-se cada vez mais necessário principalmente para:

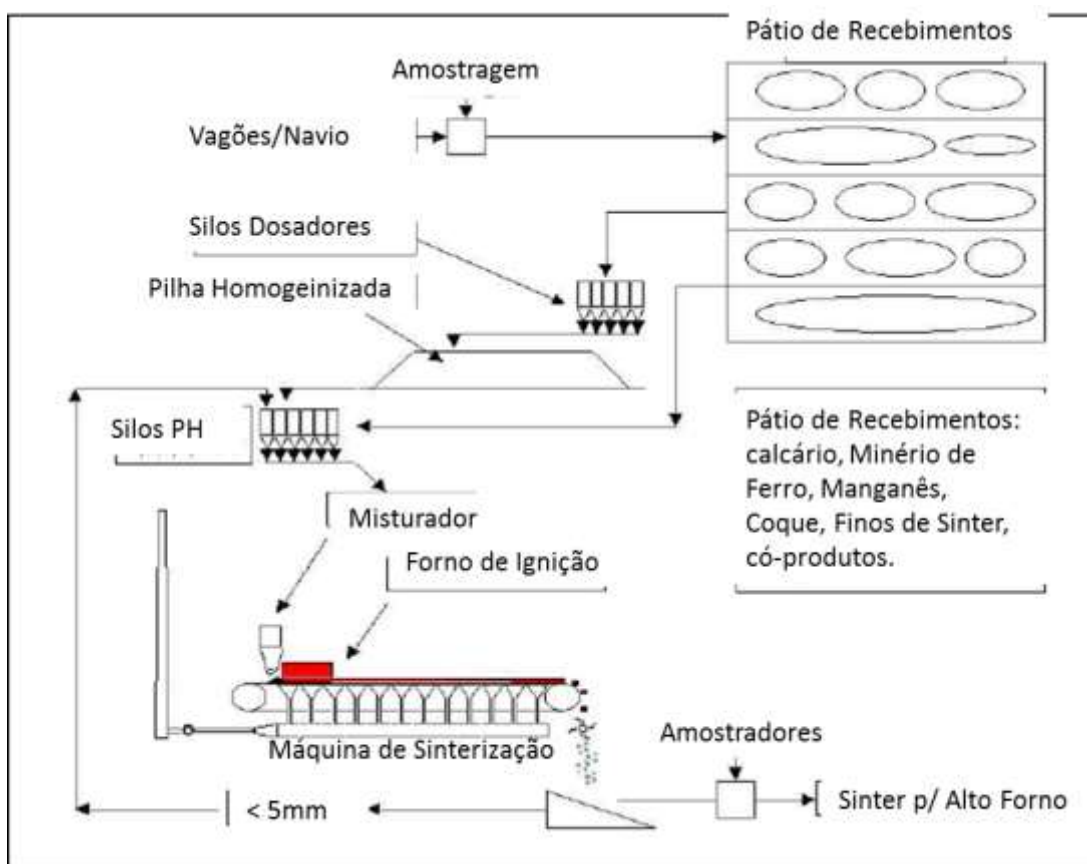
- Aproveitamento dos finos de minério;
- Reutilização de diversos pós-oriundos do processo siderúrgico;
- Adequação e controle do volume de escória dos Altos-Fornos.

Com isso, a complexidade do processo de produção do sinter vem a cada dia sendo aumentada devido a variedade de equipamentos instalados na linha de processo para permitir alcançar propriedades físicas e químicas cada vez melhores. As etapas são dependentes: empilhamento, recuperação, abastecimento, transporte, dosagem, homogeneização, distribuição, britagem, resfriamento e peneiramento. São compostas por vários equipamentos, e a falha de um equipamento pode provocar a interrupção do processo de produção do sinter e afetar o abastecimento dos Altos Fornos.

2.1.1 Recebimento e Transformação

Os recebimentos das matérias-primas para produção do sinter ocorrem por meio de vagões e ou navios e estocados no pátio de minérios e amostrados para conhecer as características da composição química. Essas matérias-primas, juntamente com os materiais recirculados (pó de Alto Forno, pó de Aciaria, etc) do processo, irão ser misturados e homogeneizados em uma pilha blendada formada, por meio do método *Chevhron*, em um segundo pátio chamado pátio de mistura. Posteriormente, a pilha é consumida. Veja a Figura 2.3.

Figura 2.3: Representação do processo de Sinterização

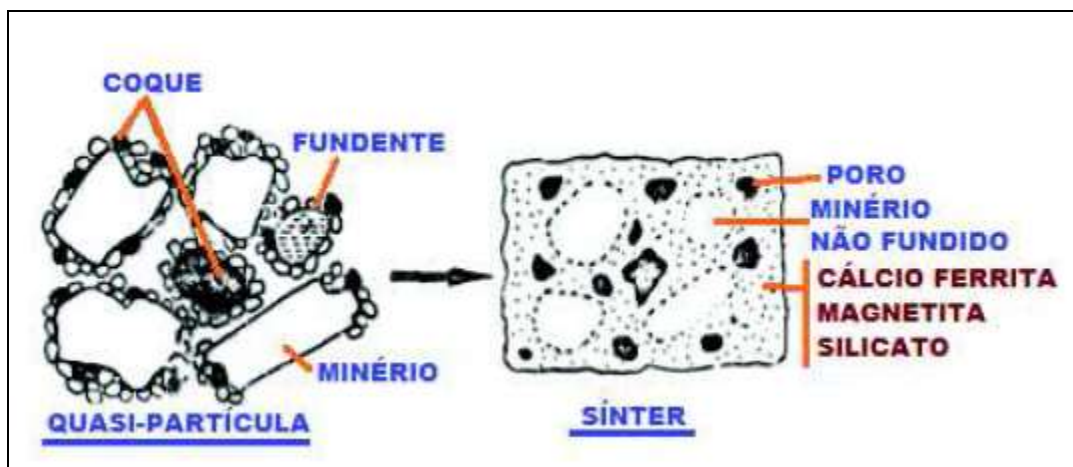


Fonte: CARDOSO (2016).

Basicamente a função dessas etapas consiste em misturar e homogeneizar finos de minérios (sinter-feed), finos de carvão ou coque, finos de fundentes (cal, etc...) e água.

A mistura homogeneizada é dosada ao longo dos silos de armazenagem de acordo com um cálculo previamente elaborado pela equipe da unidade técnica de modo que o sinter produto após o processo de sinterização atenda aos requisitos físico e químico do Alto Forno. A mistura transportada chega até os carros grelhas da Máquina de Sinterização, e, ao passar pelo Forno de Ignição inicia-se a frente de queima que se mantém por um processo de sucção forçada permeando por todo leito da mistura. Desse modo, o processo de sinterização ocorre ao longo da extensão da esteira há uma temperatura permanente de 1200 e 1400°C condição suficiente para que a umidade evapore e as partículas da carga se unam por caldeamento, queimando todo o combustível sólido, resultando então em um bloco poroso e resistente. Na Figura 2.4, são mostradas as principais reações que acontecem na formação do sinter produto.

Figura 2.4: Esquema simplificado do processo de sinterização



Fonte: Universidade de São Paulo (2013).

No fim da esteira, o síner na forma de produto é descarregado e britado para alcançar granulometria desejada.

2.1.2 Importância do síner na Carga Metálica do Alto Forno

Segundo Ulisses (Tetti, 2004), o síner ocupa uma função importante na estabilidade do Alto Forno, e, para um bom desempenho de redutibilidade é necessário:

- Propriedades químicas: porcentagem de vários compostos químicos tais como: FeO , MgO , MnO , relação $\text{CaO} / \text{SiO}_2$ entre outros;
- Propriedades físicas: distribuição granulométrica, resistência à queda, etc.;
- Propriedades metalúrgicas: índice de redutibilidade.

A composição química para produção do síner é bastante ampla a definição e irá depender do balanço de carga do Alto-Forno tomando como base a participação do síner na carga metálica, da natureza e do volume de escória produzida na fabricação do ferro-gusa. Logo, garantir a estabilidade do carregamento é primordial para evitar variabilidade no processo de produção (HONORATO, 2005).

Contudo, o síner é o produto que controla e modifica a composição química da escória dentro do Alto-Forno. Daí a importância de um carregamento estável e conhecido, pois toda modificação requer correções a fim de obter a melhor condição

operacional para alcançar alta produção, baixo consumo de combustível (*coke rate*) e o máximo aproveitamento do gás redutor.

O sinter é o constituinte majoritário dos grandes alto-fornos existentes no mundo (70 a 90% do total). Um produto granulado, poroso, com propriedades físicas, químicas e metalúrgicas ideais para o alto-forno (Castro, Figueira e Tavares, 1980).

Conforme disse Claudine (CARDOSO, 2016) a ocorrência de descontrole da composição química da escória dentro de um Alto-Forno provoca perda de temperatura interna e redução da produtividade por perda de volume útil. Com isso, são necessários a adição de quartzito e o aumento do consumo de coque combustível, para desta forma, reestabelecer a temperatura interna. Assim os custos de produção aumentam. Ocorre também a redução do poder de dessulfuração da escória, resultando na piora da qualidade do ferro-gusa, afetando também os custos de produção da área da Aciaria, pois será necessário maior tempo para preparação do aço.

2.2 RESFRIADOR DE SÍNTER

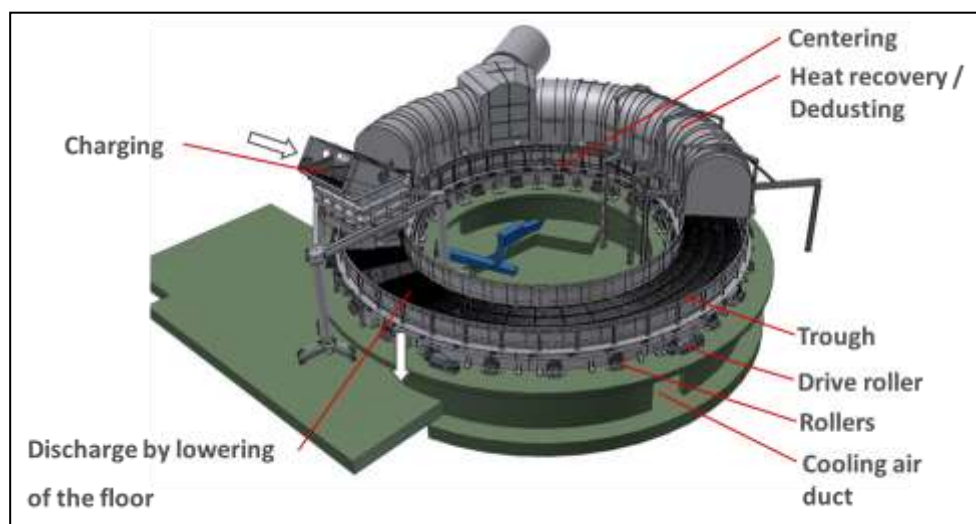
De acordo com Hélio (PEREIRA, 2004), o primeiro resfriador em escala industrial foi instalado na Steel Co. of Wales. Era um resfriador que utilizava da própria área das Máquinas de Sinterização para resfriar o material sinterizado em linha reta e possuía ventiladores de sucção. Em 1952, foi desenvolvido um resfriador separado da Máquina de Sinterização em forma de um círculo chamado de resfriador anular. Primeiramente foi instalado na empresa Appleby-Frodingham. Devido o bom desempenho e produtividade, esse tipo foi sucedido por uma variedade de resfriadores anulares com alturas de leito maiores que operavam com fluxo de gás ascendente.

Desse modo, para grandes plantas o resfriamento em linha não oferece vantagem no custo de investimento. Portanto, na maioria é equipada com resfriadores em separado e de forma anular.

O Resfriador de sinter dessa unidade siderúrgica é um dos maiores equipamentos de resfriamento de sinter existentes no mundo, possui a geometria circular e está exposto às variações térmicas inerentes ao processo de produtivo. Os

carros são afixados uns aos outros e apoiados sobre rodas, que fazem a translação do conjunto ao redor do túnel de vento até a região da descarga para descarregar o sínter frio. Veja Figura 2.5.

Figura 2.5: Resfriador Anular – Ilustração de um equipamento resfriador anular



Fonte: Paul Wurth (2012).

2.2.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do projeto de um equipamento resfriador anular é cinético e interminável. O equipamento é exposto às variações mecânicas cíclicas provocadas pelo carregamento do sínter produto, e, pelas as forças que são aplicadas por meio das rodas de acionamento montadas ao longo do conjunto de carros. Portanto, a escolha dos materiais de desgaste e estrutural seguem tais recomendações:

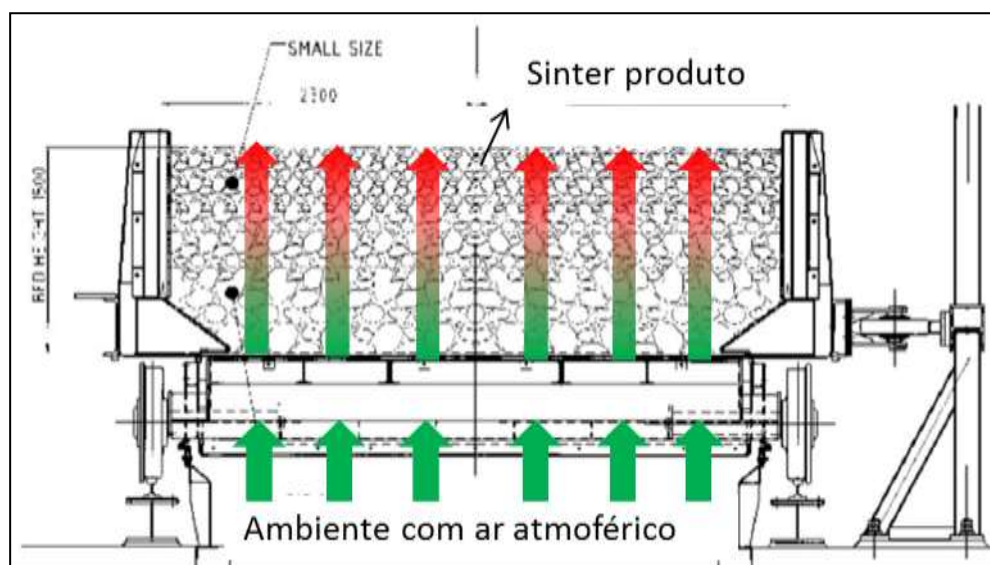
- Permitir roca rápida de componentes de desgaste por mão de obra especializada;
- Material com capacidade de suportar carga de material e variações térmicas sem se deformar;
- Material para suportar a pressão do ar soprado ao longo do túnel de resfriamento;

O movimento dá-se a partir dos motores de rotação que estão distribuídos ao longo da circunferência do equipamento Resfriador. Os motores acionam as rodas de apoio, as quais por sua vez, transmitem todo trabalho em forma de

movimento, promovendo o giro do conjunto, aplicando uma força que atua sobre o conjunto, puxando-o para o centro da trajetória em um movimento circular. Essa forma de deslocamento que provoca variações na direção e sentido interfere no vetor velocidade, submetendo assim o equipamento a esforços cíclicos.

O resfriamento ocorre ao longo da circunferência do equipamento por meio do sopro do ar atmosférico sobre pressão em um ambiente por baixo dos carros em movimento e da carga que será resfriada. O ar passa pelas venezianas do fundo dos carros e permeia o sinter produto, fazendo a troca de calor, como ilustrado na Figura 2.6.

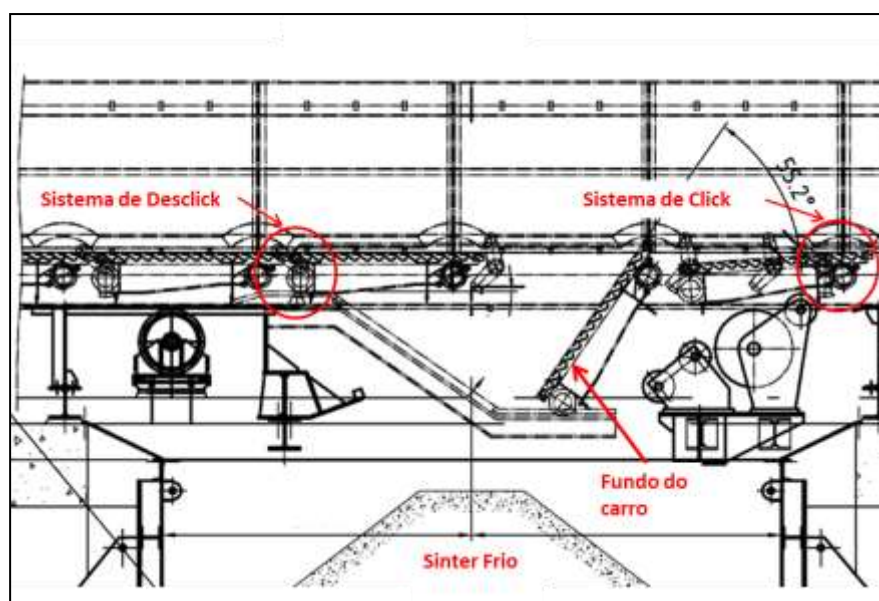
Figura 2.6: Resfriador – Esquema ilustrativo do resfriamento da massa de sinter no carro do Resfriador



Fonte: Primetals Technologies (2017).

A descarga do sinter resfriado ocorre após os carros circularem sob o túnel pressurizado pelo ar atmosférico. Pouco antes de completar a volta o fundo do carro é levantado por um trilho fixo e o sistema de travamento do fundo do carro é liberado permitindo assim o deslocamento para baixo. O movimento de giro é constante, então, o fundo do carro se desloca em um ângulo de $55,2^\circ$ provocando a queda do sinter. Então, a partir daí por gravidade inicia o movimento de descarga do sinter conforme ilustrado na Figura 2.7 abaixo.

Figura 2.7: Resfriador – Esquema ilustrativo da abertura do fundo do carro do Resfriador para descarregar o sínter frio



Fonte: Paul Wurth (2012).

Após a descarga do sínter frio o fundo do carro retorna à posição fechada por meio do sistema de *click* e inicia um novo ciclo de carregamento de sínter quente para resfriamento.

Então, observa-se a complexidade do processo siderúrgico desde o recebimento dos minerais até a transformação final no produto aço e a importância da área da Sinterização no contexto de estabilidade do processo de redução que acontece no Alto Forno.

A área da Sinterização permite a adequação da basicidade da escória formada no Alto Forno através da flexibilidade das variações químicas na produção do sínter produto, desta forma, permite maior controle da variabilidade do processo.

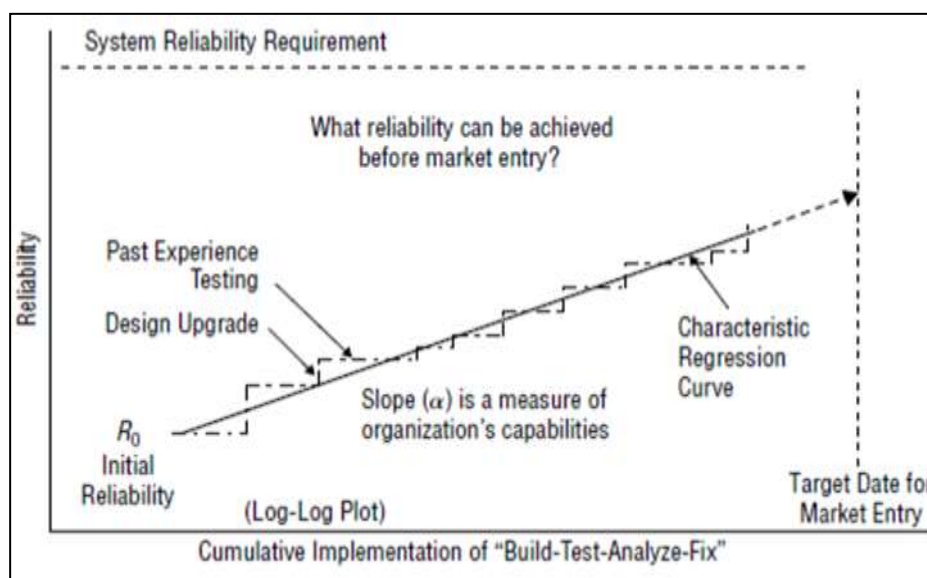
O próximo capítulo apresenta as ferramentas de análise para avaliação dos dados de falha do equipamento Resfriador a fim de verificar se houve crescimento da confiabilidade do equipamento após implantação de melhorias no projeto original.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Os modelos de crescimento de confiabilidade vêm se fazendo cada vez mais importantes para verificar o crescimento da confiabilidade de equipamentos após serem implantadas as melhorias ainda na fase de projeto e imperfeições, que vão sendo corrigidas durante a operação do equipamento a fim de alcançar as necessidades do processo ou índice de qualidade desejado na empresa.

Desenvolvido em laboratório em escala experimental é verificado o progresso de crescimento da confiabilidade após implantação de melhorias em um sistema reparável. O processo é dinâmico e à medida que as imperfeições são identificadas as causas são corrigidas por meio da melhoria dos projetos. Daí com base na confiabilidade inicial e na inclinação da linha reta entre os pontos do MTBF, o crescimento da confiabilidade ao longo do tempo pode ser previsto. Portanto, uma forma de visualizar o crescimento da confiabilidade é por meio do plano de Duane demonstrado conforme Figura 3.1 (KING e JEWETT, 1987).

Figura 3.1: Plano de Duane – Gráfico demonstrando o crescimento da confiabilidade em sistema reparáveis (testa – encontra- corrige)



Fonte: Robustness Development and Reliability Growth (1987).

Quanto mais ações corretivas são implantadas em respostas aos testes que são realizados mais confiáveis se tornam os processos/sistemas, aumentando a inclinação da curva de crescimento da confiabilidade. Os modelos de Duane e Crow

foram ajustados para estimar a taxa de crescimento desse progresso. Portanto, os modelos são os mais utilizados para estimar o crescimento da confiabilidade. Ambos utilizam dados de MTBF para análise.

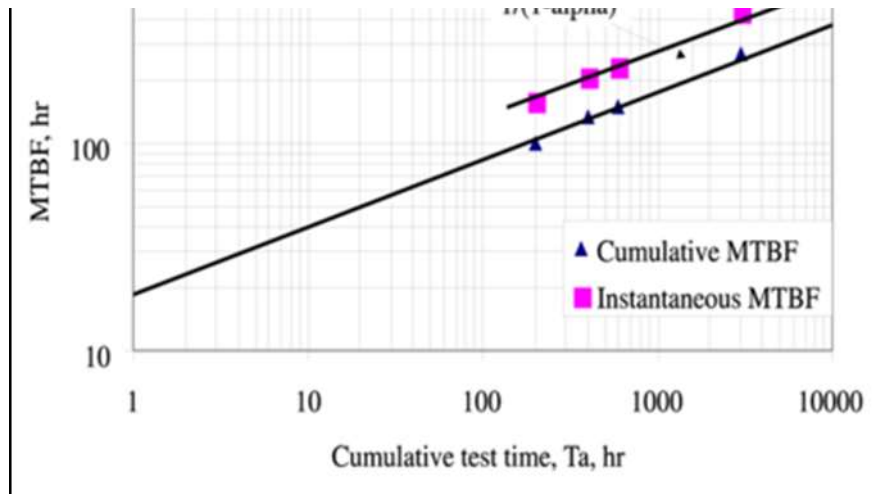
Os modelos são aplicados para situações onde as melhorias são corrigidas progressivamente permitindo assim quantificar a contribuição para confiabilidade da última correção, quando necessário. Então, para analisar o crescimento da confiabilidade de um item reparável após manutenção, esses modelos são mais indicados.

O modelo Duane não apresenta uma visão estatística. É um modelo determinístico baseado na observação do crescimento linear do MTBF, e, assume que a confiabilidade no início da análise é zero. Sendo assim, o sistema poderá ser analisado independente do tempo de vida que se encontra. Já no modelo Crow-Amsaa é considerado a “melhor prática” fazer o uso durante o processo de desenvolvimento de um equipamento, monitorando a confiabilidade dentro da fase de testes e reprojeter até alcançar a confiabilidade desejada para o projeto (SAS INSTITUTE, 2011).

3.1 O EXPERIMENTO DE DUANE

Após um estudo, em 1962, J. T. Duane publicou um relatório o qual apresentava um gráfico de falhas de diferentes sistemas relacionando o MTBF acumulado *versus* o tempo em operação acumulado. Veja a Figura 3.2.

Figura 3.2: Gráfico Logaritmo – Gráfico plotado em escala logarítmica do tempo médio entre falhas versus o tempo acumulado



Fonte: The Reliability Professional (2016).

Com base nesse estudo, foi possível verificar o crescimento da confiabilidade onde se observou a variação de alfa (α) e o crescimento do MTBF com a inclinação da linha reta para cima. A inclinação da reta para cima demonstra o crescimento da confiabilidade, pois o tempo entre a falha está aumentando ao longo do tempo.

O modelo de Duane foi fundamentado na ideia da Lei dos Retornos Decrescentes, que ocorrerá nos sistemas complexos, a redução da taxa de falhas (α), que diretamente implica o crescimento do MTBF e a confiabilidade dos sistemas (J.T. Duane, 1964, p. 174).

A partir daí Duane desenvolveu a fórmula como segue:

$$MTBF_c = \frac{T}{N(T)}$$

Sendo, $y = mx + c$, onde:

$$y = \ln(MTBF_c)$$

$$x = \ln(T)$$

$$m = \alpha$$

$$c = \ln(b)$$

Teremos:

$$\ln(MTBF_c) = \alpha \ln(T) + \ln b$$

O modelo de Duane utiliza-se de dois parâmetros para estimar a confiabilidade esperada de sistemas reparáveis α (alpha) e β (beta). Observe que,

os parâmetros são definidos a partir de um conjunto de dados usando métodos de ajustes de curvas, no entanto não há nenhuma outra teoria que fornece uma base para estimativa a priori (RELIASOF, 2015).

Quando os valores de α e β estiver entre zero e um, indica que a confiabilidade está melhorando e conseqüentemente o MTBF do sistema. O Quadro 3.1 mostra valores obtidos a partir do estudo de vários sistemas para referência de resultados de α (alpha).

Quadro 3.1: Referência de valores de alpha (α) para diferentes sistemas

Sistema	Inclinação
Sistema computacional	0,26
Sistema computacional mainframe	0,50
Eletrônica aeroespacial	0,65
Radar	0,60
Motor de foguete	0,46
Turbina de aeronave	0,35
Sistema hidromecânico complexo	0,60
Gerador de aeronave	0,38

Fonte: Reliasoft (2015).

Observa-se que para Sistemas Computacionais, as melhorias em projetos de software não proporcionam grande efeito sobre a taxa de crescimento de alpha ($\alpha=0,26$). Em contrapartida os Sistemas de Eletrônica Aeroespacial e Radar, onde as melhorias estão voltadas para avanço tecnológico e novos componentes o efeito sobre a taxa de crescimento alpha é alto ($\alpha= 0,65$ e $0,60$ respectivamente).

No entanto, para o caso do Resfriador de Sínter, objeto desse estudo, podemos utilizar como referência os sistemas Turbina de aeronave e Sistema Hidromecânico Complexo devido às similaridades mecânicas. Daí os valores de alpha (α) deve estar entre 0,35 a 0,60. Ambos são compostos por peças de desgastes e componentes metálicos que estão sujeitos às intempéries do ambiente.

3.2 ESTRUTURA DUANE PARA SISTEMAS COMPLEXOS

Sendo assim, para sistemas complexos onde existem vários modos de falhas, os dados devem ser estruturados considerando o MTBF acumulado em uma tabela conforme Tabela 3.1 para após carregar no software e gerar os gráficos para análise.

Tabela 3.1: Exemplo do levantamento de dados de falhas acumulados no tempo de um sistema complexo

Falhas no Intervalo	MTBF Acumulado (horas)
9	80
1	90
4	150
12	400
10	650
4	800
3	1500
7	2500
6	3000
10	4000
9	5000
6	6000

Fonte: The Reliability Professional (2016).

Com os dados de falhas organizados e carregados no modelo Duane, o sistema apresenta o gráfico demonstrando o crescimento da confiabilidade por meio da inclinação da linha reta do MTBF ao longo do tempo.

Conforme João (LAFRAIA, 2001) quando o tempo de observação é curto, são gerados poucos dados de falhas, não sendo suficientes para definir qualquer modificação no projeto do equipamento que proporcione garantia no crescimento da confiabilidade. Portanto, o tempo de observação deverá ser suficiente para levantamento de dados consistente para compor uma boa análise e fundamentar melhorias no projeto.

Felipe (PEREIRA, 2003) já afirmava que os dados para análise do crescimento poderiam ser organizados de três formas diferentes:

- Dados de confiabilidade: registro da confiabilidade em diferentes tempos;
- Sucesso/Insucesso: tempo determinado em operação de várias unidades em paralelo indicando o número de falhas;
- MTBF: tempo médio entre as falhas;

Contudo, pode-se dizer que a implantação de melhorias em um determinado projeto traz benefícios para o crescimento da confiabilidade, no entanto, a observação e organização dos dados de falhas conforme o modelo de análise é determinante para assertividade da verificação se houve crescimento da confiabilidade de um sistema/processo.

Assim, o modelo de Duane apresenta-se mais adequado para análise da verificação do crescimento da confiabilidade do equipamento. Pois, trata-se de um sistema reparável que passou por modificações no projeto original em busca de aumento da confiabilidade.

No próximo capítulo os dados de falhas serão estruturados conforme modelo de Duane para análise.

4 DESENVOLVIMENTO

Ao longo do período de análise o equipamento Resfriador teve importantes modificações no projeto na busca de aumento da confiabilidade. Então, o período da análise compreende todas essas modificações do projeto original.

Desse mesmo modo, também é importante salientar que nesse período os itens de desgastes (buchas, rodas etc.) foram trocados por apresentar desgaste elevado caracterizando fim de vida útil. Assim, não necessitando de nenhuma modificação no projeto original. O conhecimento da vida útil desses itens é importante para definir a periodicidade de manutenção.

Conforme citado por Mariana (COSTA, 2013) a manutenção é vista como função estratégica, respondem diretamente pela disponibilidade e confiabilidade dos ativos física e afeta a qualidade dos produtos finais e o resultado da empresa. Portanto, entender o tipo de manutenção adequada para a organização é garantir a otimização dos processos, possibilitando máxima produtividade.

As melhorias de projeto, e, a rotina de manutenção estabelecida ao longo desse tempo tem a expectativa de aumento da confiabilidade do equipamento Resfriador de sínter. Com isso, os dados foram coletados e estruturados no modelo Duane para verificar quantitativamente se houve crescimento na confiabilidade.

De acordo com Viviane (MAFRA, 2012) toda avaliação científica é feita sobre resultados quantitativos, e, deve ser apresentada ao usuário final para tomada de decisão a certa do seu sistema.

4.1 ESTRUTURA DOS DADOS

Os resultados observados durante o período seguem as definições estruturais e suas características de acordo com o modelo de crescimento de Duane, mostrado no Quadro 4.1.

Quadro 4.1: Critérios para organização dos dados de falhas conforme modelo Duane

Campo	Definição
Número de Pontos	É o número de intervalos observados durante o tempo de análise
Tempo Acumulado	É a soma acumulada ao longo do tempo da duração do intervalo
Falhas Acumulada	É a soma acumulada ao longo do tempo das falhas que ocorrem no intervalo
MTBF Acumulado	É o tempo médio entre a falha acumulado ao longo do tempo. Formula: $MTBF = \frac{1}{(Taxa\ de\ falhas\ acumulada)}$

Fonte: Autor (2017).

A partir daí os dados coletados no sistema de gerenciamento das falhas da Máquina de síter foram formatados em uma tabela no Microsoft Excel. Foi estabelecido um intervalo de a cada 168 horas para analisar quantitativamente as falhas e o MTBF. Desta forma, os dados de falha foram agrupados e os tempos exatos da falha não são mais conhecidos.

Então, com isso, foi definida as formulas dinâmicas para cálculo dos tempos acumulados entre as falhas do MTBF. Veja abaixo a Tabela 4.1 como os resultados.

Tabela 4.1: Dados de falhas e MTBF acumulado estruturado conforme modelo de Duane

Falhas no Intervalo	MTBF Acumulado (horas)
13	12
0	38
6	65
3	95
2	130
1	171
3	213
5	253
3	295
6	335

Continua...

2	377
3	420
2	465
3	510
6	554
3	598
3	642
13	682
10	718
1	756
3	795
2	835
3	875
1	917
0	960
2	1004
2	1049
0	1096
3	1142
1	1190
5	1238
0	1287
1	1337
3	1387
6	1436
3	1485
1	1535
0	1587
2	1639
3	1691
1	1744
2	1797
1	1851
0	1907
0	1964
0	2022
0	2081
0	2142
1	2203
0	2266
4	2328
0	2391
0	2456
0	2522
0	2589
2	2656
1	2724

Continua...

0	2793
0	2863
1	2934
0	3006
0	3080
0	3154
2	3229
2	3304
0	3380
1	3456
0	3534
1	3534

Fonte: Autor, (2017).

Desse modo, os dados foram carregados no sistema *Reliasoft RGA*, e, utilizando o modelo de Duane os gráficos foram plotados para análise como segue.

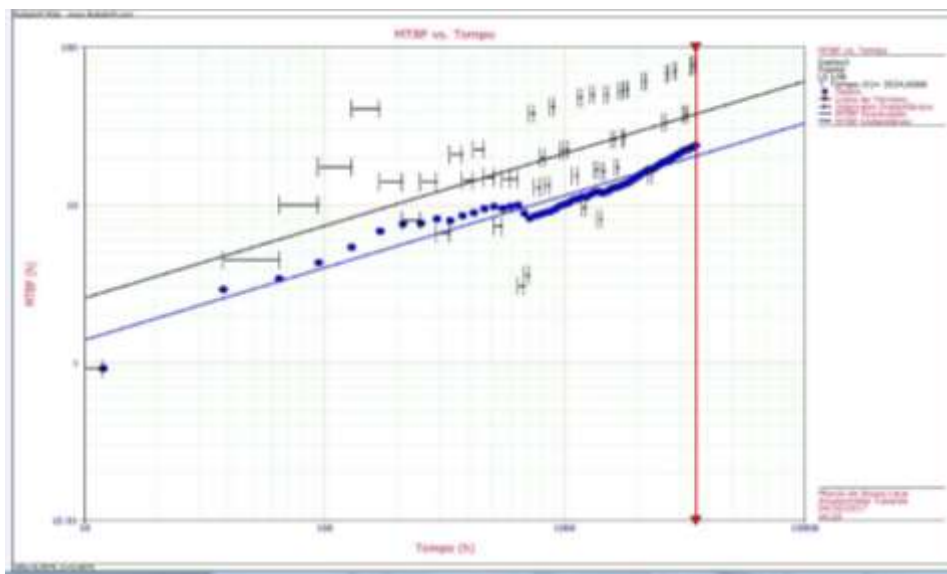
4.2 RESULTADOS

Os resultados obtidos apresentam valores de α e β de 0,45 e 0,48 respectivamente. Desta forma, demonstram o crescimento da confiabilidade do equipamento que baseada na interpretação dos dois parâmetros do modelo de Duane α e β , quando os valores estão entre zero e 1 indicam o crescimento da confiabilidade.

4.2.1 Gráficos MTBF e Intensidade de Falhas no tempo

O Gráfico 4.1 foi gerado no software da Reliasof RGA, para análise, após inserção dos dados de falhas agrupados no modelo Duane observa-se crescimento do MTBF ao longo do tempo através da inclinação para cima da linha reta com base nos dados.

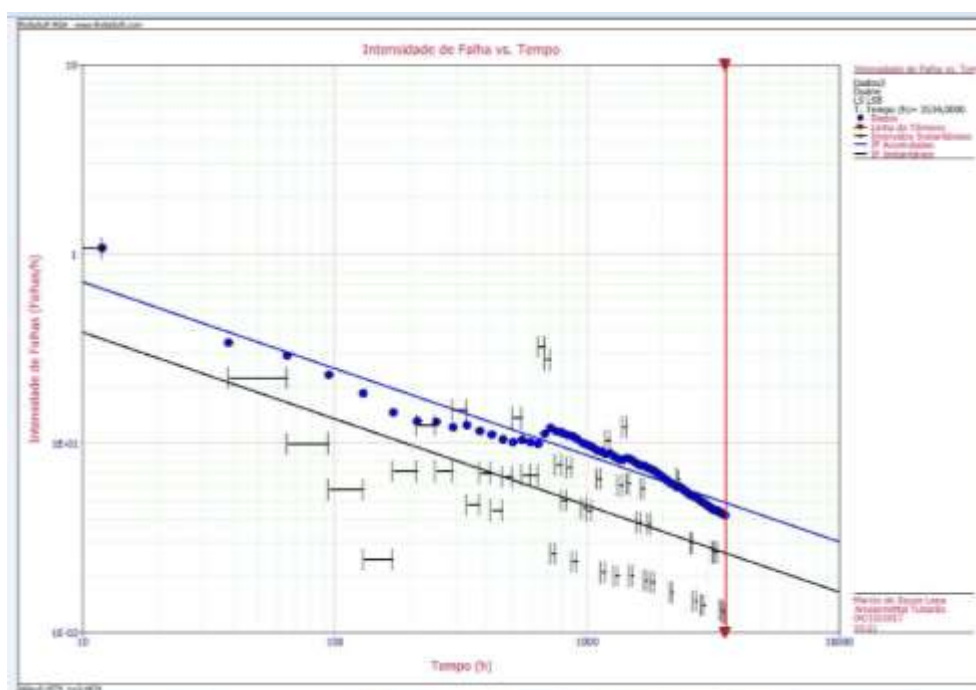
Gráfico 4.1: Crescimento do MTBF vs Tempo do sistema Reliasoft RGA do equipamento Resfriador



Fonte: Autor (2017).

O Gráfico 4.2 observa-se a redução da taxa de falhas ao longo do tempo através da inclinação para baixo da linha reta.

Gráfico 4.2: Redução da taxa de falhas ao longo do tempo do equipamento Resfriador



Fonte: Autor (2017).

Ambos os gráficos apresentam informações de dados acumulados e instantâneos ao longo do tempo, com isso, é possível estimar a confiabilidade do equipamento no tempo desejado. No exemplo da Figura 4.1 foram estimados o MTBF instantâneo e a quantidade de falhas esperadas no tempo futuro de um ano, 12.174 horas.

Figura 4.1: Imagem do Realiasoft RGA com as simulações de MTBF e quantidade de falhas esperadas no tempo de 12.174 horas



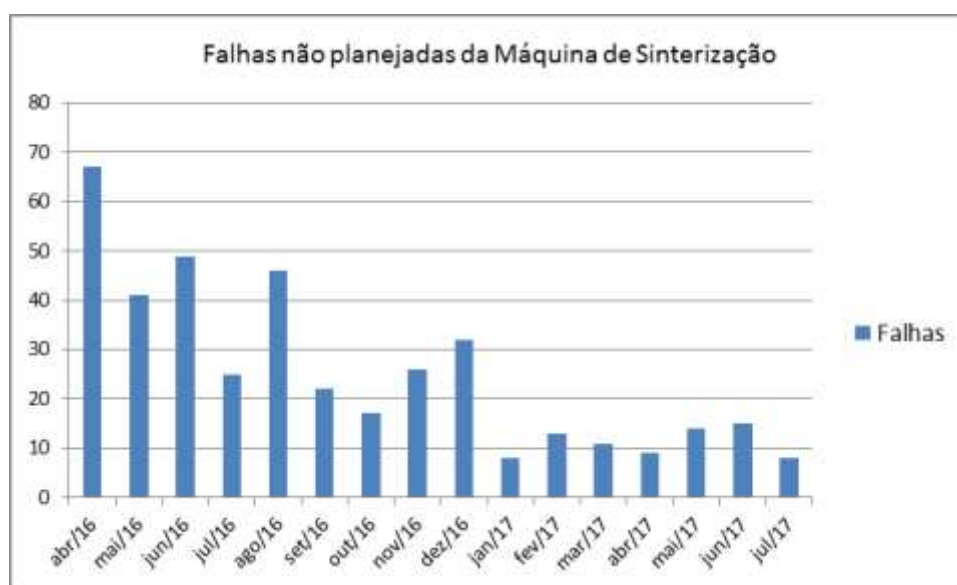
Fonte: Autor (2017).

Observa-se que o MTBF instantâneo aumenta do patamar de 37,87 para 66,73 horas. Então, é esperado que a confiabilidade do equipamento aumenta ainda mais ao longo do tempo. A quantidade de falhas nesse tempo se dá pela diferença entre as falhas acumuladas no tempo 3.534 e 12.174 horas, assim totalizando 164 falhas.

4.2.2 Análise dos Resultados

O resultado do cálculo dos dados de falhas do equipamento Resfriador de sinter, conforme o modelo de Duane, apresentou valores de α e β entre 0 e 1 sendo: 0,45 e 0,48 respectivamente. Desta forma, confirma que houve um crescimento da confiabilidade após implantação de melhorias no projeto original. O Gráfico 4.3 de paradas não planejadas da Máquina de Sinterização.

Gráfico 4.3: Gráficos de paradas não planejadas da Máquina de Sinterização



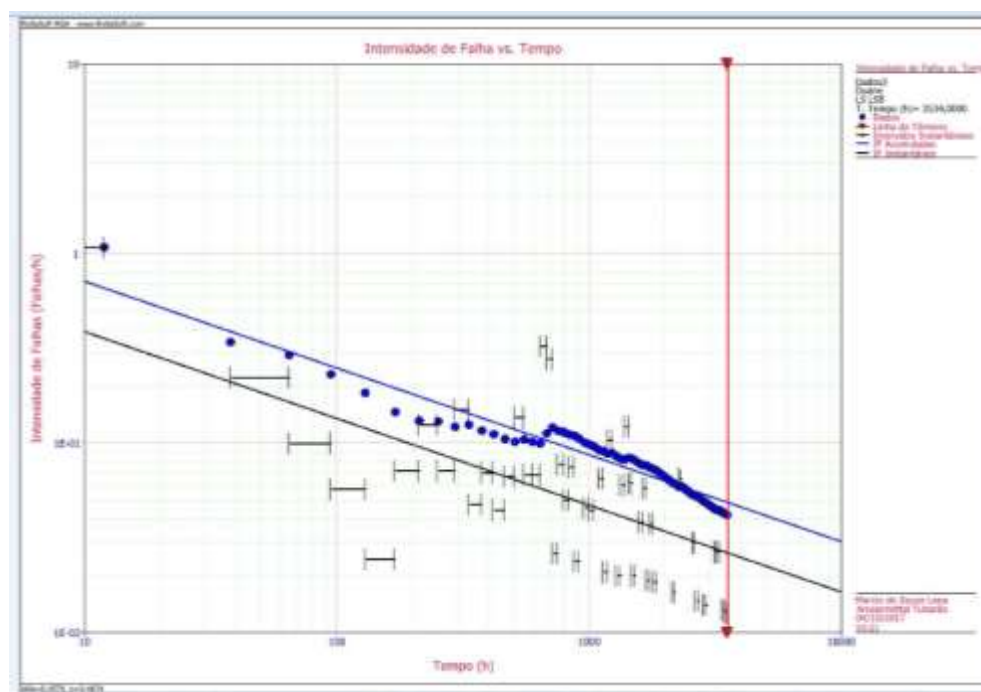
Fonte: Autor (2017).

Observa-se que, na medida em que as melhorias do projeto do Resfriador foram implantadas, a quantidade de paradas não planejadas na Máquina de Sinterização reduz significativamente. Com isso, também a taxa de falhas da Máquina de Sinterização melhorou, no mês de julho de 2017 atingiu-se 0,21% o menor valor da história do tempo de operação.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se o crescimento da confiabilidade do equipamento Resfriador, após a implantação de melhorias no projeto original, com a aplicação do modelo de análise do crescimento da confiabilidade de Duane utilizando o *Software* da Reliasoft RGA. Os valores de α e β foi de 0,45 e 0,48 respectivamente. Também é possível observar pela redução das falhas do equipamento ao longo do tempo no Gráfico 5.1.

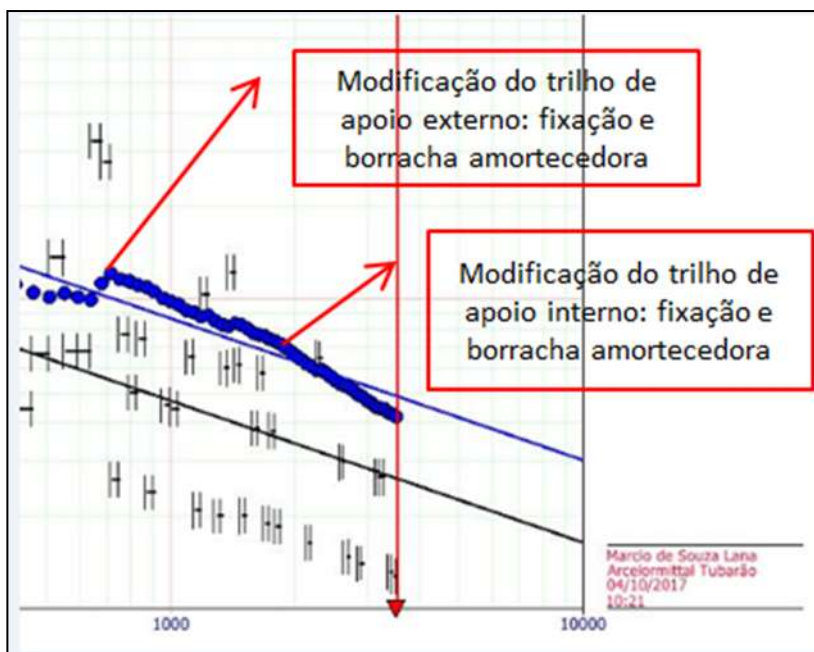
Gráfico 5.1: Redução da taxa de falhas ao longo do tempo do equipamento Resfriador



Fonte: Autor (2017).

O equipamento possuía deficiência na fixação dos trilhos de apoio, daí junto com a engenharia e fornecedores nacionais foi desenvolvido novo projeto de fixação e borracha de amortecimento em forma de raio. A Figura 5.1 ilustra a nova concepção do projeto.

Gráfico 5.2: Gráfico expandido da redução da taxa de falhas ao longo do tempo do equipamento Resfriador



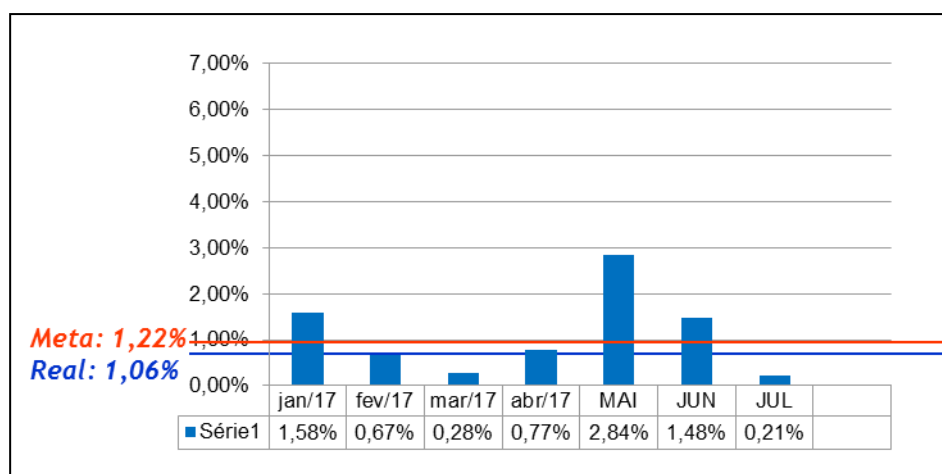
Fonte: Autor (2017).

A modificação do aumento do número de rodas equalizadoras e trilhos com maior resistência a compressão foram implantadas ao longo do tempo.

Principalmente com essas modificações foi observada maior estabilidade na operação do equipamento, sendo confirmado o crescimento da confiabilidade com a aplicação do modelo Duane, utilizando-se dos dados de falhas coletados nesse tempo.

O resultado de UMSR da Máquina de Sinterização tem atingido valores históricos no ano de 2017. Nesse ano concluiu-se a implantação da modificação dos trilhos de apoio interno, o aumento do número de rodas equalizadoras e a montagem dos trilhos de alta resistência à compressão. O Gráfico 5.3 apresenta os resultados e a meta acordado para atingir a produção.

Gráfico 5.3: Taxa de falhas não programadas da Máquina de Sinterização após implantação das melhorias no Resfriador



Fonte: Autor (2017).

O resultado obtido suportará a empresa na tomada de decisão para aprimorar a gestão dos ativos de manutenção e orientar decisões orçamentárias para o ano seguinte.

Na organização dos dados de falhas para análise conforme o modelo foi a parte mais desafiadora do estudo. Para isso, aprofundamos as pesquisas e leituras de artigos na busca por exemplos práticos de maneira a ilustrar situações semelhantes à do estudo. No entanto, encontram-se poucas publicações do assunto e a base fundamental foi teórica, referenciada no capítulo 3 desse trabalho.

A proposta de trabalhos futuros seria um estudo das falhas desse equipamento projetando o MTBF instantâneo para os 5 anos seguintes para orientar decisões orçamentárias da empresa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2002. (modelo de referência com autoria coletiva).

MAFRA, Vivian. **Método multicritérios para definição do sistema mais adequado para implantação da manutenção centrada na confiabilidade**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Eletricista, Curitiba, 2012.

COSTA, Mariana de Almeida. **Gestão estratégica de manutenção : uma oportunidade para melhorar o resultado operacional**. 2013. 103 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção)–Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

TETTI, Ulisses. **Sistema de controle dos componentes químicos do sínter de minério de ferro baseado em controle automático e controle estatístico do processo**. 2004. 109 f. Requisito para a obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia Mecânica. Gestão da Qualidade Total. Campinas, 2004. S.P. – Brasil
CARDOSO, Claudine Guimarães Leite. Desenvolvimento e caracterização de sínter a partir de resíduos sólidos siderúrgicos para aplicação em aciaria. 2016. 87 f. Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA, 2016.

SILVA, José Nazareno Santos. **Curso de siderurgia da escola técnica do Brasil e-tec Brasil**. 2011. 110 f. Instituto federal de educação ciência e tecnologia do Belém do Pará. 2011.

RGA10, Quick start guide. **ReliaSoft Corporation**. RPQSR10. Worldwide Headquarters 1450 South Eastside Loop Tucson, Arizona 85710-6703, USA.

RGA10, Quick start guide. **ReliaSoft Corporation**. RPUGRG10. Worldwide Headquarters 1450 South Eastside Loop Tucson, Arizona 85710-6703, USA.

HONORATO, Edilson Pinto. **Adequação granulométrica das matérias-primas e do sistema de segregação contínua (I.S.F), para melhorias na produtividade e qualidade do sínter para os altos-fornos**. 2005. 126 f. Dissertação de mestrado a ser apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). 2005.

PEREIRA, Helio Cardoso. **Avaliação em escala piloto do comportamento dos produtos pellet feed, pellet screenings e micro pellet em substituição ao sínter feed em uma mistura de sinterização**. 2004. 146 f. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)-Belo Horizonte. 2004.

DUANE, J.T., "**Learning Curve Approach To Reliability Monitoring**," IEEE Transactions on Aerospace, Vol. 2, pp. 563-566, 1964.

RELIASOFT, **Reliability growth and repairable system data analyse reference**. 2015. 392 f. Tucson, Arisona USA. www.weibull.com/mil_std/mil_hdbk_189c.pdf.

SAS, Institute Inc. World Headquarters. **Institute Inc. product or service names are registered trademarks or trademarks of SAS Institute Inc. in the USA and other countries.** ® indicates USA registration. Other brand and product names are trademarks of their respective companies. 2011. 106026_S98412.1012.