

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCAS VILCHAK

**MELHORIA NO PROJETO DE MÁQUINAS DE UMA LINHA DE
PRODUÇÃO TÊXTIL POR MEIO DA ANÁLISE DE MODOS DE FALHA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**GUARAPUAVA
2018**

LUCAS VILCHAK

**MELHORIA NO PROJETO DE MÁQUINAS DE UMA LINHA DE
PRODUÇÃO TÊXTIL POR MEIO DA ANÁLISE DE MODOS DE FALHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Guarapuava.

Orientador: Prof. Dr. David Lira Nuñez

GUARAPUAVA
2018

TERMO DE APROVAÇÃO

MELHORIA NO PROJETO DE MÁQUINAS DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO TÊXTIL POR MEIO DA ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS

LUCAS VILCHAK

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em Guarapuava, Paraná na data 15 de junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

David Lira Nuñez
Prof. Orientador

Luan José Franchini Ferreira
Membro Da Banca

Denise Alves Ramalho
Membro Da Banca

Aldo Przybysz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Lucas Vilchak

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio na realização deste trabalho, assim como, de toda a trajetória no período da faculdade.

Agradeço ao meu orientado, Prof. Dr. David Lira Nuñez pelos ensinamentos, pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Gostaria de agradecer também aos professores que compuseram a banca avaliadora deste trabalho, pelas críticas construtivas que ajudaram a deixar este trabalho ainda mais completo. E a todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço também, ao responsável em me receber na empresa onde foi desenvolvido o estudo de caso, pois tornou possível a realização deste trabalho e sempre estive disposto a me auxiliar no que lhe coubesse.

E meu agradecimento especial à minha esposa, que esteve o tempo todo ao meu lado, incondicionalmente. Nos momentos mais difíceis, sempre me fazendo acreditar que chegaria ao final desta difícil, porém gratificante etapa. Este período nos mostrou a verdade sobre nosso relacionamento: somos uma Família!

RESUMO

VILCHAK, Lucas. **Melhoria no projeto de máquinas de uma linha de produção têxtil por meio da análise de modos de falha**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2018.

A pesquisa desenvolvida consiste em propor melhorias no projeto de um componente crítico de uma das máquinas inseridas no processamento de algodão de uma indústria do ramo têxtil. Para tal, será feita uma coleta de dados, de especialistas e especificações dos fabricantes, referentes ao seu funcionamento e posterior análise de falhas dos principais componentes rotativos do equipamento estudado por meio da utilização da técnica FMEA. Através desta ferramenta, busca-se encontrar comportamentos anormais dos principais componentes mecânicos do equipamento, classificá-los segundo o critério de criticidade que cada um traz ao processo e posteriormente realizar análise de elementos finitos, utilizando cenários realísticos, para se chegar ao melhor modelo que o componente selecionado pode assumir para garantir confiabilidade ao processo. O estudo será realizado de maneira descritiva aplicada, utilizando um meio fabril para análise do processo produtivo e realização da investigação processual, coleta de dados qualitativos e quantitativos, para posterior desenvolvimento da FMEA e da análise de elementos finitos. A partir do auxílio destas ferramentas, será feita uma melhoria do componente selecionado para o estudo de caso, promovendo uma melhora significativa na expectativa de vida útil do mesmo, podendo assim, assegurar uma maior confiabilidade ao componente e por consequência, uma melhora na disponibilidade operacional da linha de produção, diminuindo intervenções de manutenção desnecessárias.

Palavras-chave: FMEA, componentes mecânicos, análise de elementos finitos.

ABSTRACT

VILCHAK, Lucas. **Improvement in the design of machines of a textile production line through analysis of failure modes**. 2018. Final Term Paper to obtain a bachelor's degree in Mechanical Engineering - Federal Technological University of Paraná. Guarapuava, 2018.

The research development consists of proposing improvements in the design of a critical component of one of the machines inserted in the cotton processing of a textile industry. For this purpose, a data collection, of experts and specifications of the manufacturers will be made, regarding its operation and later analysis of failures of the main rotating components of the equipment studied through the use of FMEA technique. Through this tool, it is sought to find abnormal behavior of the main mechanical components of the equipment, to classify them according to the criterion of criticality that each one brings to the process and later to perform analysis of finite elements, using realistic scenarios, to arrive at the best model that the selected component can take over to ensure process reliability. The study will be carried out in a descriptive applied way, using a hypothetical factory to analyze the production process and perform the process investigation, qualitative and quantitative data collection, for further development of FMEA and finite element analysis. Based on the aid of these tools, an improvement will be made to the component selected for the case study, promoting a significant improvement in the life expectancy of the case, thus ensuring greater reliability to the component and consequently an improvement in the operational availability of the production line, reducing unnecessary maintenance interventions.

Keywords: FMEA, mechanical components, finite element analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Os benefícios da implementação da RCM.....	21
Figura 2 - Exemplo de FEA aplicada em um modelo de aerofólio.....	24
Figura 3 - Exemplo de utilização de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD)	24
Figura 4 - Protocolo de pesquisa.....	28
Figura 5 – Layout da linha de produção	31
Figura 6 - Vista interna da máquina Trützschler carda TC	33
Figura 7 - Representação esquemática dos principais subsistemas da máquina de carda	35
Figura 8 - Sistema alimentador de flocos	36
Figura 9 - Sistema de entrada da carda	37
Figura 10 - Unidade de pré-abertura	37
Figura 11 - Área do tambor e dos flats móveis.....	38
Figura 12 - Área do doffer e saída da fita cardada	39
Figura 13 – Vista explodida do modelamento do tambor	45
Figura 14 – (a) Esquema de fixação do eixo e polia. (b) Diagrama de corpo livre. ...	47
Figura 15 - Simulação estática de flexão-torção utilizando malha grosseira	48
Figura 16 - Simulação estática de flexão-torção utilizando malha refinada.....	48
Figura 17 - Simulação estática de flexão-torção com aplicação de filetes nos cantos vivos	49
Figura 18 - Simulação estática de flexão-torção utilizando aço-liga 20MnCrS5.....	50
Figura 19 - Simulação estática de flexão-torção utilizando aço carbono 1045.....	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro resumo da metodologia da pesquisa adotada	26
Quadro 2 - Histórico de manutenção máquina de carda	41
Quadro 3 - Escala para avaliação dos efeitos dos modos de falha	42
Quadro 4 - Escala para avaliação do grau de diagnóstico	43

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

CAD	Desenho Assistido por Computador (do inglês - <i>Computer-Aided Design</i>)
CAE	Engenharia Assistida por Computador (do inglês - <i>Computer-Aided Engineering</i>)
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBM	Manutenção baseada na Condição (do inglês - <i>Conditional-Based Maintenance</i>)
FMEA	Análise de Efeitos e Modos de Falhas (do inglês - <i>Failures Mode and Effect Analysis</i>)
MEF	Método dos Elementos Finitos (do inglês - <i>Finite Element Method</i>)
MTBF	Tempo Médio Entre Falhas (do inglês - <i>Mean Time Between Failures</i>)
MTTR	Tempo Médio para Reparo (do inglês - <i>Mean Time To Repair</i>)
NBR	Norma Brasileira
RCM	Manutenção Centrada na Confiabilidade (do inglês - <i>Reliability Centered Maintenance</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	11
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	11
1.3 JUSTIFICATIVA	12
1.4 OBJETIVOS	13
1.4.1 Objetivo geral	13
1.4.2 Objetivos Específicos	14
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 GESTÃO DA MANUTENÇÃO	16
2.1.1 Tipos de manutenção	16
2.1.1.1 Manutenção Corretiva	16
2.1.1.2 Manutenção preventiva	17
2.1.1.2.1 <i>Manutenção Preventiva baseada na condição</i>	18
2.2 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO	19
2.2.1 Manutenção centrada em confiabilidade RCM	19
2.2.1.1 Análise de efeito e modo de falha (FMEA)	21
2.2.2 Confiabilidade	22
2.2.2.1 Manutenibilidade	22
2.3 MELHORIAS DE PROJETO	22
2.3.1 Engenharia assistida por computador (CAE)	23
2.3.2 Análise de Elementos Finitos (FEA)	25
3 ASPECTOS METODOLÓGICOS	26
3.1 PROTOCOLO DE PESQUISA	27
4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE CASO	30
4.1 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	30
4.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE FIOS DE ALGODÃO	32
4.3 COMPONENTES ROTATIVOS DA MÁQUINA CARDA TC	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1 APLICAÇÃO DA FERRAMENTA FMEA PARA DETERMINAR O COMPONENTE CRÍTICO	40
5.2 ANÁLISE DO ELEMENTO SELECIONADO	45
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS	53
6.1 CONCLUSÃO	53
6.2 RECOMENDAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS	56
APÊNDICE A – FMEA DA MÁQUINA DE CARDA	60

1 INTRODUÇÃO

O cenário industrial global teve uma expressiva mudança após a segunda guerra mundial, desde então a gestão de ativos físicos era vista como um gerador de custos à empresa. Em seguida, passou-se a vê-la como uma função estratégica para proporcionar maior disponibilidade e confiabilidade ao maquinário industrial. Devido a esse fato, a gestão de equipamentos industriais desempenha um papel fundamental na fabricação de produtos, não apenas na fase de produção, mas também para garantir o ciclo de vida destes (MULLER; SUHNER; IUNG, 2007).

Nesse sentido, as organizações industriais buscam por sistemas produtivos confiáveis, acarretando grandes investimentos em melhorias no setor da manutenção industrial. Um equipamento em perfeitas condições de funcionamento, maximiza a produção e, conseqüentemente a lucratividade. Dessa forma, as organizações não desejam que seus sistemas apresentem falhas, ou operem de maneira ineficiente, para tal, é necessário ser considerado que nenhum ativo físico industrial opera perfeitamente ao longo de sua vida útil (MOBLEY; HIGGINS; WIKOFF, 2008).

Devido a este fator, é necessário a implantação de sistemas de gestão de ativos que garantam o perfeito funcionamento dos equipamentos quando requeridos. Uma maneira de conseguir isto, é priorizando as potenciais falhas nos ativos físicos, e a severidade destes em relação ao impacto na linha de produção em que estão inseridos, utilizando a Análise de Efeitos e Modos de Falhas (FMEA – do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*).

E quando tratamos de indústria, certos equipamentos apresentam menor impacto perante outros, muitas vezes é preferível deixá-lo entrar em falha funcional e aplicar uma manutenção corretiva. Porém equipamentos primordiais à linha de produção, que requerem de segurança, confiabilidade e disponibilidade operacional, necessitam de monitoramento das suas funções, utilizando técnicas preditivas como análise de vibrações, análise de óleo, análise de ultrassom, emissão acústica, entre outras para prevenir que falhas repentinas venham a ocorrer, e comprometam a produção (MOBLEY; HIGGINS; WIKOFF, 2008).

A aplicação das técnicas citadas anteriormente, e as demais formas de gestão de ativos físicos, não gera apenas aumento da eficiência ao equipamento em si, ou na qualidade do produto, mas traz ótimos resultados para toda a empresa. Desde segurança aos operadores, evitando acidentes de trabalho, até menores impactos

ambientais com a degradação de solos e mananciais devido a vazamentos de óleos lubrificantes, ou poluição sonora devido a elevadas taxas de ruídos, por exemplo (SIMÕES, 2011).

Neste contexto, o presente trabalho visa aplicar a FMEA afim de identificar, principalmente por meio do critério de severidade, um componente mecânico inserido na máquina em estudo, que caso venha entrar em falha funcional, ocasionaria graves danos a linha de produção em que o ativo físico está inserido.

Posteriormente, utilizando a Engenharia Assistida por Computador (CAE – do inglês *Computer Aided Engineering*), serão realizadas simulações empregando situações reais de funcionamento do equipamento, com o intuito de promover melhorias no projeto do componente mecânico selecionado na FMEA, para proporcionar uma maior confiabilidade ao componente e conseqüentemente uma vida útil adequada conforme projeto da máquina.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Identificar falhas funcionais nos componentes mais críticos da linha de produção de uma empresa do ramo têxtil e propor melhorias de projeto, coletando dados do ambiente de operação e manutenção do maquinário para alimentar a FMEA. Assim, após identificar um componente mecânico crítico de uma máquina inserida na linha de produção, serão realizadas simulações de condições de funcionamento a fim de realizar melhorias no funcionamento do componente.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Os três principais problemas encontrados, e que objetivaram o trabalho, foram:

- 1) A necessidade de uma linha de produção ininterrupta, promovendo a confiabilidade dos equipamentos, para a produção;
- 2) Identificação de componentes críticos do equipamento em estudo, afim de garantir disponibilidade a linha de produção e diminuição de custos de manutenção.

- 3) A análise de esforços no funcionamento do componente mecânico que possibilitem a melhoria do projeto mecânico.

A identificação do componente crítico do equipamento utilizando a FMEA e sua posterior simulação computacional, busca melhorar o material usado na fabricação, as características geométricas e dimensionais, visando elevar a confiabilidade deste.

1.3 JUSTIFICATIVA

Atualmente, o sistema operacional das empresas se baseia na produção em larga escala e não se admite paradas inesperadas. Este novo cenário requer melhorias em gestão de ativos físicos, devido aos grandes custos que acarretam na economia da empresa e refletem na elevação do preço do produto final entregue ao cliente (SIMÕES, 2011).

Assim, busca-se meios estratégicos de se garantir a disponibilidade operacional e confiabilidade de ativos industriais, assim como maior qualidade e segurança na produção. Uma alternativa muito eficaz empregada, é o monitoramento dos equipamentos da linha de produção por meio de técnicas preditivas (VILES et al., 2007; SILVA et al., 2016; MOBLEY, 2002).

Este monitoramento é um meio consistente de se antecipar as falhas, já que com a modernização dos setores de produção houve implantação de novas tecnologias, assim como um aumento considerável nas diversidades e quantidades de equipamentos utilizados. Com o peso destes fatores surge uma maior probabilidade que falhas ocorram nos ativos industriais, e a falha funcional de um equipamento crítico em uma planta afeta a capacidade produtiva da empresa, aumentando os custos operacionais e interfere na qualidade do produto final (NUNES, 2001; MODGIL; SHARMA; SINGH, 2013; KAREEM; JEWOW, 2015).

Kareem e Jewo (2015) corroboram que ao monitorar os parâmetros de processo baseados em condições é possível identificar o estado de saúde, desempenho e integridade do equipamento e com o tratamento destes dados pode-se estabelecer a taxa de deterioração em que se encontra o maquinário, e se necessário intervir com manutenção preventiva para evitar perda da produção.

No entanto, somente a manutenção, sendo ela preventiva ou não, não é capaz de gerar resultados satisfatórios se os componentes do equipamento apresentarem falhas de projeto. Estas falhas na estrutura, podem ser analisadas e sanadas por meio de ensaios mecânicos, como por exemplo, o de tração, compressão, torque, cisalhamento, entre outros. Mas, estes testes possuem como característica a posterior inutilização do elemento em estudo, sendo assim, uma estratégia que acaba gerando elevado custo.

Uma solução é utilizar métodos computacionais que simulem o funcionamento real dos equipamentos, especificamente dos seus componentes mecânicos rotativos, que possibilita que o projetista tenha bastante flexibilidade na aplicação de cargas e condições de contorno, o que torna este método o mais amplamente utilizado para análises do comportamento mecânico de elementos (SÁNCHEZ, 2001; MARZO, 2010).

Nesse sentido, o presente trabalho visa identificar um equipamento crítico na linha de produção, com base em dados do seu histórico e planejamentos estratégicos da empresa, para analisar seus principais componentes mecânicos e identificar, utilizando a FMEA, o componente de maior criticidade, ou seja, que é o mais crítico e possui maior importância ao equipamento, para modelar tal elemento por meio de um programa de CAE, e realizar análises de esforços para chegar a um projeto que possibilite o aumento da sua confiabilidade para com a produção da linha fabril ao qual pertence.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Levantar dados de um equipamento crítico de uma determinada linha de produção real, a fim de identificar um componente de maior criticidade por meio da sua severidade determinada pela FMEA. Posteriormente realizar a modelagem e simulação do componente mecânico selecionado para submetê-lo a esforços, e chegar a uma melhor confiabilidade, possibilitando alterações do projeto.

1.4.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, tem-se de executar as seguintes etapas:

- Efetuar a revisão da literatura acerca de conceitos relevantes ao tema do trabalho;
- Conhecer um processo produtivo real, similar ao proposto por este trabalho;
- Mapear o processo produtivo para compreensão dos modos de operação e manutenção existentes;
- Levantar dados referentes ao histórico de intervenções de manutenção realizados no equipamento a ser estudado;
- Abordagem da FMEA para identificar, por meio do critério de severidade, o componente com maior criticidade do equipamento;
- Realizar simulação, por meio da CAE, para identificar melhorias que possam ser feitas no componente crítico;
- Propor melhorias no componente em estudo, proporcionando uma melhor manutenibilidade e conseqüentemente uma maior confiabilidade ao maquinário em estudo.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis capítulos, com as seguintes estruturas de tópicos:

Capítulo 1: neste capítulo faz-se uma introdução contextualizando o tema, delimitação do tema, hipótese, justificativa, objetivo geral e específico, conjuntamente com a estrutura do trabalho.

Capítulo 2: apresenta-se, de forma detalhada, o referencial teórico sobre gestão de ativos na indústria para melhorias de projeto, contemplando os tipos de manutenção, e método de simulação computacional.

Capítulo 3: este capítulo compõe a descritiva do método para a realização do presente trabalho, contendo o enquadramento do tema de pesquisa dentro da grande

área da Engenharia Mecânica conjuntamente com a construção do protocolo de pesquisa referente às etapas do presente trabalho.

Capítulo 4: este capítulo aborda o estudo de caso, realizado na empresa em estudo do segmento têxtil, onde é feito o levantamento dos dados a serem utilizados na pesquisa. Tais dados contemplam o mapeamento do processo produtivo, as particularidades das atividades de manutenções empregadas, a análise realizada para determinação do componente crítico para estudo.

Capítulo 5: estrutura-se a análise dos resultados e discussões da pesquisa.

Capítulo 6: são descritas as conclusões e recomendações de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente trabalho visa a realização de um estudo de caso a fim de se chegar a resultados que apresentem uma melhoria no projeto de um componente mecânico crítico inserido em uma máquina ligada a linha de produção. Com isso, auxiliar na elevação da disponibilidade operacional da linha. Para tal, são utilizados conceitos relacionados com a confiabilidade na manutenção, especificamente a FMEA, simulações computacionais utilizando ferramentas da CAE, os quais serão conceituados neste capítulo.

2.1 GESTÃO DA MANUTENÇÃO

Mobley, Higgins e Wikoff (2008) enfatizam que os gestores da manutenção devem estabelecer planejamento de manutenção, sendo assim uma forma eficaz de reduzir o número e a frequência de reparação. A longo prazo, a mudança nesta filosofia resultará em considerável redução no tempo de inatividade. Pois quando as máquinas são reparadas de maneira eficiente, estas executarão suas funções dentro do tempo de projeto estipulado.

2.1.1 Tipos de manutenção

A manutenção pode ser definida como a função industrial que executa atividades técnicas visando preservar a função original dos ativos industriais e evitar a ocorrência de falhas, obtendo como resultado a disponibilidade operacional, aumento de produtividade e otimização de custos. A manutenção industrial pode ser classificada basicamente em dois tipos: corretiva e preventiva (FONSECA ET AL. 2016; PARIDA; KUMAR, 2006).

2.1.1.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva consiste em reparar os maquinários que apresentaram qualquer tipo de avaria. Pode ser empregada de duas maneiras, corretiva planejada

e não planejada. Para Otani e Machado (2008) a diferença entre as duas formas de manutenção corretiva é que, na não planejada a falha ocorre de maneira inesperada, ocasionando perda de produção, maiores danos aos equipamentos e por consequência acarreta em maiores custos para a organização. A corretiva planejada é a falha premeditada por inspeções de cunho preditivo, ou ainda por opções da gerencia de se operar até ocorrer a falha, assim acarretando em custos menores, devido a não ter impacto significativo na linha de produção e envolve menores ou nenhuma perda da produção.

A manutenção corretiva deve ser realizada por profissionais devidamente qualificados, peças de reparo e ferramentas adequadas. A má atividade de reparo acarretará em danos severos ao maquinário, muitas vezes mais graves do que o modo de falha observado (MOBLEY; HIGGINS; WIKOFF, 2008).

2.1.1.2 Manutenção preventiva

A manutenção preventiva tem características diferentes da corretiva, na qual é definida para situações em que não se caracterizou uma falha no equipamento, portando, agindo de forma a reduzir a probabilidade que falhas venham a ocorrer. É uma intervenção de manutenção prevista, periódica, anterior da data provável do aparecimento da falha (NUNES, 2001; TAVARES, 2012; BARAN, 2012).

Para Marcorin e Lima (2003), pelo fato da manutenção preventiva possuir a característica de reduzir os riscos de paradas não programadas, torna-se mais vantajosa em relação a corretiva em máquinas ligadas diretamente ao processo. No entanto, esta técnica possui algumas desvantagens, pois a troca de algum componente pode ser feita precipitadamente, possuindo uma longa vida útil, assim como pode haver falhas antes do tempo previsto, devido a característica de intervenções periódicas, e não baseadas na condição de operação.

Esta imprevisibilidade requer estoques de peças de reposição, elevando os custos relativos, pois a manutenção preventiva realiza intervenções muitas vezes desnecessárias, assim reduzindo a produtividade e elevando o custo operacional. No entanto, este procedimento pode ser uma boa alternativa para equipamentos ou peças que apresentam desgastes em ritmo constante e que representam baixo custo (MARCORIN; LIMA, 2003).

2.1.1.2.1 Manutenção Preventiva baseada na condição

A Manutenção baseada na Condição (CBM do inglês - *Conditional-Based Maintenance*) ou também conhecida como manutenção preditiva, é um meio de garantir a aplicabilidade adequada das intervenções preventivas.

Para Mobley (2002) e Baran (2012), a CBM é um programa de manutenção preventiva orientada por condições. Ao invés de realizar paradas periódicas, baseando-se apenas em estatísticas do tempo médio de vida de equipamentos ou instalações, a preditiva considera paradas baseadas em monitoramento das condições das máquinas quando estão em pleno funcionamento. Esse monitoramento irá evidenciar anomalias mecânicas, perdas de eficiência, entre outros fatores, e podendo realizar uma estimativa dos tempos de intervenção do maquinário para manutenção.

Devido a este monitoramento realizado nos equipamentos, a manutenção perde a característica de intervir periodicamente, e passa a realizar reparos somente quando apresentar informações de falhas, como por exemplo altas vibrações e perda de desempenho (JARDINE; BANJEVIC; MAKIS, 1997).

Caso o equipamento esteja funcionando de acordo como o especificado, não haverá paradas para reparos. Este conceito de manutenção, baseado no monitoramento periódico, eleva de maneira significativa a confiabilidade, devido a não realizar paradas demasiadas ou operar o maquinário até se concretizar a avaria, cenário este que pode acarretar em uma linha de produção parada, gerando perdas a empresa (TAVARES, 2012; MOBLEY, 2002).

Estes monitoramentos em componentes mecânicos são feitos através de várias técnicas preditivas instrumentadas e não instrumentadas, as quais baseiam-se em: análise de vibrações, termografia, tribologia, ultrassom, emissão acústica e inspeção sensitiva (MOBLEY, 2002).

Mobley (2002) define cada técnica de análise de condição como se segue:

- **Termografia:** A termografia analisa a emissão de energia infravermelha para determinar a condição de operação. Tendo aplicabilidade no monitoramento de diversos sistemas, por exemplo, condições de máquinas, estruturas e sistemas da planta, assim como de equipamentos elétricos.

- **Tribologia:** analisa as condições de lubrificação dos componentes mecânicos, podendo ser empregada a análise de óleo lubrificante e análise de partículas de desgaste.
- **Inspeção visual:** foi a primeira ferramenta preditiva a ser empregada no meio industrial. Baseia-se no uso dos sentidos do técnico mantenedor (visão, tato, olfato e barulho).
- **Inspeção por Ultrassom:** essa ferramenta monitora frequências de ruídos acima de 30.000 Hz. Altas frequências são úteis para aplicações selecionadas, como a detecção de vazamentos que geralmente geram ruídos de alta frequência.
- **Análise de Vibração:** a técnica mais utilizada no meio industrial. Seu range de medição é de oscilações que possuam frequências entre 1 a 30.000 Hz.
- **Emissão acústica:** a análise de emissão acústica é realizada através do método de contagem de hits e o de RMS. Para o primeiro, realiza a contagem de sinais cuja amplitude ultrapassou um nível limite em um determinado tempo. Já o RMS calcula a média da potência do sinal de cada hit (AL-GHAMD; MBA, 2006).

2.2 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO

2.2.1 Manutenção centrada em confiabilidade RCM

A estratégia RCM, é uma técnica que identifica de maneira sistêmica, intervenções preventivas necessárias para assegurar a máxima confiabilidade possível de equipamentos, quando estes recebem manutenção eficaz (DHILLON, 1999, 2006; SMITH; MOBLEY, 2007; CARAZAS; SALAZAR; SOUZA, 2011).

Mobley, Higgins e Wikoff (2008) acrescentam que a RCM identifica as falhas funcionais do sistema e a causa delas, os efeitos causados por estas falhas, e aponta de que forma esses efeitos são importantes. Após reunir estas informações poderá empregar uma gestão de ativos mais adequada.

Para Dhillon (2006) os princípios básicos da RCM são:

- Estabelecer prioridades relacionadas ao projeto que possam facilitar a manutenção preventiva de forma eficaz;

- Planejar tarefas de manutenção preventivas que possam reestabelecer a segurança e a confiabilidade a níveis originais em caso de deterioração do sistema ou equipamento;
- Recolher os dados necessários para a melhoria de projeto de elementos com confiabilidade original insatisfatória;
- Cumprir os três objetivos acima mencionados com um custo total mínimo (isto é, incluindo o custo de falhas residuais e o custo de manutenção).

De acordo com Moubray (1997), Dhillon (2006) e Mobley, Higgins e Wikoff (2008), fundamentalmente o processo de RCM procura responder as seguintes perguntas:

1. Quais são as funções requeridas e padrões associados ao desempenho do ativo no seu contexto operacional atual?
2. De que forma ela não atende às suas funções designadas?
3. Quais são as causas específicas de cada falha funcional?
4. Quais são os efeitos específicos de cada mau funcionamento ou falha?
5. De que maneira específica cada falha ou mau funcionamento é importante?
6. Quais são os principais sintomas que uma falha pode apresentar;
7. Que ações possíveis podem ser tomadas para prever ou prevenir a ocorrência de cada falha?
8. O que deve ser feito quando não pode ser estabelecida uma atividade proativa pertinente?

Respondendo as oito questões acima listadas, pode-se chegar às causas dos problemas e com isso, por meio da FMEA, determinando soluções cabíveis para sanar as inconformidades.

A Figura 1 mostra os benefícios advindos da implantação da RCM. A execução do plano de manutenção centrada em confiabilidade, traz imensas vantagens à empresa, indo desde melhoria na qualidade de seus produtos, disposição de um banco de dados para cálculo do desempenho da efetividade da manutenção, até melhorias na segurança com pessoas e meio ambiente.

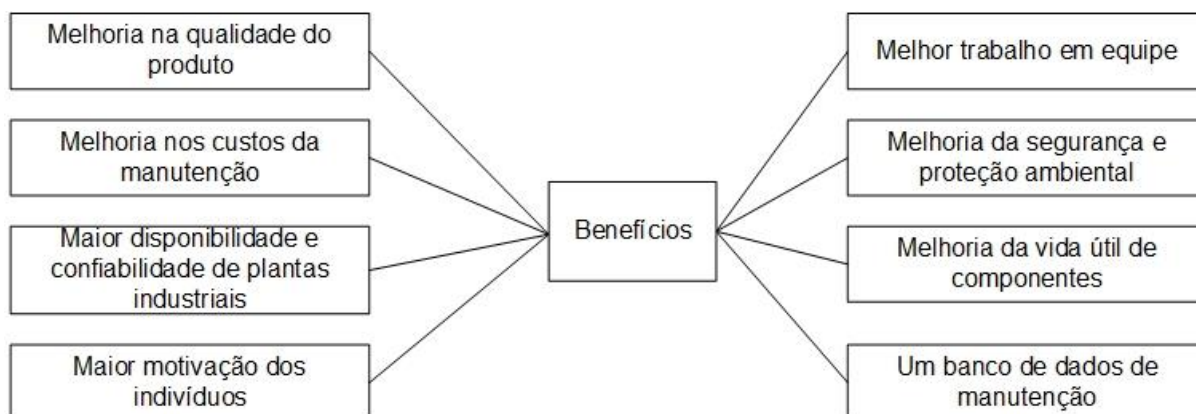


Figura 1 – Os benefícios da implementação da RCM.
Fonte: Adaptado de Dhillon (2006).

Este trabalho foca no uso da FMEA para identificação do componente mais crítico para o funcionamento correto de um determinado equipamento. Uma vez identificado o componente, o presente trabalho foca nas causas de falha vinculadas a erro ou avaria de projeto, para posterior análise, por meio da simulação, e propor melhorias de projeto.

2.2.1.1 Análise de efeito e modo de falha (FMEA)

FMEA é uma ferramenta utilizada para identificar e priorizar falhas potenciais em equipamentos, sistemas ou processos e formular propostas de ações de melhoria. (KARDEC; NASCIF, 2015).

Segundo Toledo e Amaral (2006), a análise de efeito e modo de falha, pode ser aplicada tanto no desenvolvimento do projeto do produto como do processo:

FMEA de produto: são consideradas as falhas que poderão ocorrer com o produto dentro das especificações do projeto. O objetivo desta análise é evitar falhas no produto ou no processo decorrentes do projeto.

FMEA de processo: são consideradas as falhas no planejamento e execução do processo, ou seja, o objetivo desta análise é evitar falhas do processo, tendo como base as não conformidades do produto com as especificações do projeto.

2.2.2 Confiabilidade

Para Kardec, Lafraia (2002) e Moubray (1997) definem confiabilidade como sendo a “confiança” (probabilidade), de que um componente, equipamento ou sistema desempenhe a sua função básica, durante um período de tempo preestabelecido, sob condições de operação padronizadas.

A metodologia RCM busca manter a confiabilidade do sistema industrial por meio da análise dos modos de falhas funcionais (eventos de falhas ocorridos) e potenciais (probabilidade de ocorrência) evitando a reincidência ou ocorrência das falhas com o direcionamento, de forma sistêmica e dinâmica, das adequadas estratégias de manutenção a serem executadas diante da realidade da operação dos ativos industriais. (MOUBRAY, 1997; DHILLON, 2006; MOREIRA et al., 2016).

Bandeira, Costa e Lopes (2016) destacam que a metodologia RCM aponta ações de engenharia que evitem a ocorrência de falhas, maximizando a produtividade com redução de custos, assegurando que os ativos físicos industriais realizem as funções determinadas em seus projetos de modo a proporcionar vantagem competitiva para as empresas.

2.2.2.1 Manutenibilidade

Segundo Kardec, Nascif (2015) manutenibilidade, é a característica de um equipamento ou conjunto de equipamentos que permite a execução dos serviços de manutenção, com maior ou menor grau de facilidade. A manutenibilidade pode ser melhorada com a implementação de sistemas de detecção e indicação de desgastes, condição anormais de funcionamento ou falhas, tais fatores que podem ser conquistados através da implantação da CBM.

2.3 MELHORIAS DE PROJETO

Uma maneira eficiente de elevar a confiabilidade de componentes mecânicos inseridos em ativos físicos, é através do aprimoramento do mesmo pela utilização da análise de projeto.

Uma maneira de realizar tal análise, seria através da construção de um protótipo para ensaios em laboratório, onde instrumentos de medição estrategicamente distribuídos coletariam dados de tensões, deformações, velocidades, forças, etc. Entretanto, a metodologia de construção e ensaio de diversos protótipos costuma consumir mais tempo e recursos do que seria o desejável, não sendo, portanto, a solução ideal. Neste cenário, entra a tecnologia de CAE que permite a realização de uma grande quantidade de cálculos em tempo reduzido (SANTOS; FERREIRA; PIAIA, 2004).

2.3.1 Engenharia assistida por computador (CAE)

Segundo a Siemens PLM Software, o termo CAE é o uso de softwares computacionais para simular o desempenho de maneira a proporcionar melhorias em projetos de produtos ou ajudar na resolução de problemas de engenharia para uma ampla variedade de setores.

CAE usa o método de Análise por Elementos Finitos (FEA do inglês - *Finite Element Analysis*), discutido mais adiante, onde este discretiza o sólido modelado em um software de Projeto Assistido por Computador (CAD -do inglês – *Computer Aided Design*) em um grande número de partes pequenas, resolvendo então um conjunto de equações algébricas para obter os resultados desejados em função do carregamento e das condições de contorno (SANTOS; FERREIRA; PIAIA, 2004; MARZO, 2010).

Segundo a Siemens PLM Software, CAE possui três etapas:

- 1) A fase de pré-processamento: corresponde a fase de utilização do CAD para modelagem da geometria do componente a ser analisado, inserção das propriedades físicas do elemento, e a partir da aplicação das condições de contorno já se restringe a plataformas de CAE.
- 2) A fase de solução: são aplicadas fórmulas matemáticas adequadas a física de suporte, condizentes com a geometria do projeto e com as condições de contorno.
- 3) A fase de pós-processamento: apresenta os resultados obtidos, os quais devem ser interpretados pelo engenheiro responsável pela análise.

Segundo Santos, Ferreira, Piaia (2004) e Nanni (2016), os softwares de CAE auxiliam na resolução de problemas que envolvem uma ampla variedade de fenômenos estudados na engenharia incluindo:

- Análise de tensão e dinâmica em componentes ou montagens usando FEA, Figura 2;

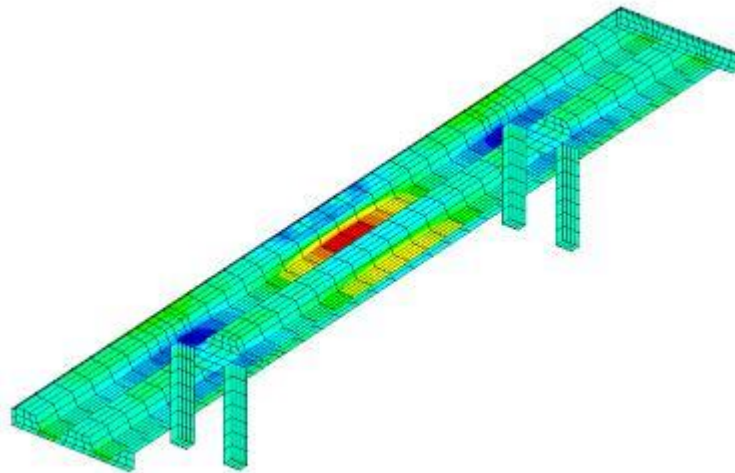


Figura 2 - Exemplo de FEA aplicada em um modelo de aerofólio
Fonte: Azevedo (2003)

- Análise térmica e de fluido usando Dinâmica de Fluido Computacional (CFD – do inglês *Computer Fluid Dynamics*), Figura 3;

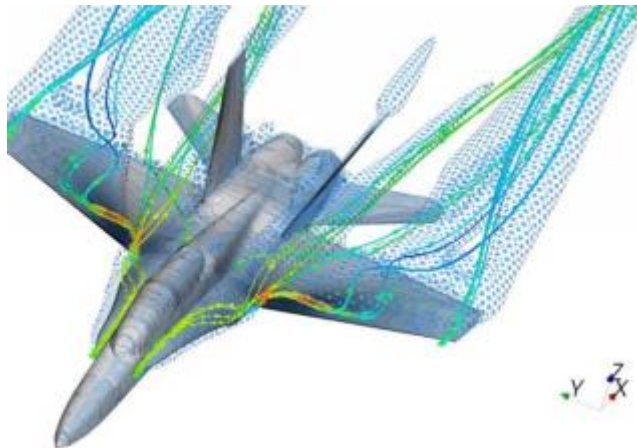


Figura 3 - Exemplo de utilização de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD)
Autor: Teixeira; Rodrigues (2016)

- Análise dinâmica dos mecanismos;
- Simulação de eventos mecânicos;
- Análise acústica utilizando FEA ou o método de elemento de contorno;
- Análise de sistemas de controle;

- Simulação de processos de manufatura como injeção, moldagem e forjamento;
- Otimização do produto ou processo.

2.3.2 Análise de Elementos Finitos (FEA)

Este método, considera a região de solução do problema formada por um número finito de pequenos elementos interligados entre si (malha), gerando uma solução aproximada com mínimo de erro (SÁNCHEZ, 2001; GIACCHINI, 2012).

Uma vez que estes elementos podem ser colocados juntos em um número incontável de diferentes configurações, pode-se modelar formas geométricas bastante complexas. Além disso, possibilita que o projetista tenha bastante flexibilidade na aplicação de cargas e condições de contorno, o que torna este método o mais amplamente utilizado para análises estruturais (SÁNCHEZ, 2001; MARZO, 2010).

Segundo Leinart, é importante tomar cuidado na geração da malha do modelo para estudo para garantir resultados concisos e ao mesmo tempo garantir uma rapidez na conclusão dos resultados. Neste sentido, é interessante utilizar malha de boa qualidade em descontinuidades geométricas e nos locais de maior interesse, e nos locais de menor interesse utilizar elementos maiores.

Quando surge a necessidade de projetar uma estrutura, é habitual realizar uma sucessão de análises e modificações das suas características, afim de obter uma solução satisfatória, quer em termos econômicos, quer a verificação dos pré-requisitos funcionais regulamentares (AZEVEDO, 2003).

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Pesquisas são requeridas mediante a necessidade de se encontrar resposta à problemas propostos. Busca-se a pesquisa quando não se dispõem de informações suficientes para responder ao problema, ou então quando as informações disponíveis se encontram em um estado de desordem que não possam ser adequadamente relacionadas a um determinado problema ou aplicação (GIL, 2002; PRODANOV; FREITAS, 2013).

A pesquisa pode ser dividida em quatro parâmetros: quanto à natureza, quanto aos objetivos, quanto aos procedimentos e em relação à forma de abordagem (GIL, 2002; PRODANOV; FREITAS, 2013). A classificação da metodologia aplicada referente ao método de pesquisa do presente trabalho encontra-se no Quadro 1.

Quesito	Classificação							
	Natureza	Objetivos	Procedimentos	Abordagem				
	Aplicada	Básica						
	Exploratória	Descritiva	Explicativa					
	Pesquisa Bibliográfica	Pesquisa Documental	Pesquisa Experimental	Observação direta	Levantamento de dados	Pesquisa de Campo	Estudo de caso	Pesquisa-ação
	Pesquisa Quantitativa	Pesquisa Qualitativa						

Quadro 1 – Quadro resumo da metodologia da pesquisa adotada
Fonte: Autoria própria.

A classificação de natureza desta pesquisa é considerada como aplicada, pois, procura gerar conhecimento para aplicação prática voltada para a solução de problemas por meio do melhoramento de projeto através da CAE. Quanto aos objetos a pesquisa pode ser de cunho exploratório, descritivo ou explicativo, no qual este trabalho utiliza a forma descritiva. Esta é apresentada por Gil (2002) e Prodanov e Freitas (2013) como sendo a pesquisa onde os fatos de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis são registrados, analisados, classificados e interpretados, através do uso de técnicas padronizadas de coleta de dados: questionários e observação sistemática, sem que o pesquisador interfira sobre eles, ou seja, os fenômenos do mundo físico e humano são estudados, mas não são manipulados pelo pesquisador.

Para Prodanov, Freitas (2013) e Gil (2002) a pesquisa quanto aos procedimentos técnicos, está relacionada com o planejamento da pesquisa, que

envolve tanto a diagramação quanto a maneira na qual os dados necessários para a elaboração da pesquisa são levantados. Neste quesito, a presente pesquisa quanto aos procedimentos técnicos se aplica a pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, levantamento de dados, pesquisa de campo e estudo de caso.

Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, esta pesquisa classifica-se como quantitativa e qualitativa, pois coleta informações quantitativas quanto ao processo de produção na empresa que serve como estudo de caso e estrutura estratégias qualitativas, por meio da FMEA, para avaliação da confiabilidade dos equipamentos deste processo.

3.1 PROTOCOLO DE PESQUISA

De acordo com Gil (2002), Prodanov, Freitas (2013), a elaboração do protocolo de pesquisa define a metodologia a ser utilizada para a aplicação dos dados obtidos e auxilia a aumentar a confiabilidade do estudo de caso. A pesquisa fornece ao investigador um caminho para o conhecimento, que durante a passagem da formulação do problema até a apresentação dos resultados, passa pelas seguintes fases: preparação da pesquisa, pesquisa de campo, processamento de dados, análise dos dados e elaboração do relatório de pesquisa. A Figura 4 apresenta detalhadamente o protocolo de pesquisa do trabalho.

Mediante o protocolo de pesquisa (Figura 4), pode-se detalhar as suas etapas:

- Preparação da Pesquisa: nesta etapa é definido o problema da pesquisa por meio de revisão da literatura, através da consulta em livros, artigos técnicos, científicos. Também se define o ramo industrial de desenvolvimento do trabalho, a qual será uma indústria têxtil;
- Trabalho de Campo: esta etapa compreende as seguintes ações elencadas: Mapeamento do processo produtivo da empresa de pesquisa para melhor compreensão do processo de fabricação e interdependências de máquinas e equipamentos durante a fabricação. Este mapeamento se dará por meio de pesquisa de campo, observação direta e entrevistas com funcionários da produção e manutenção industrial, obtendo como resultado o layout da fábrica com identificação do maquinário e funções de cada ativo físico;

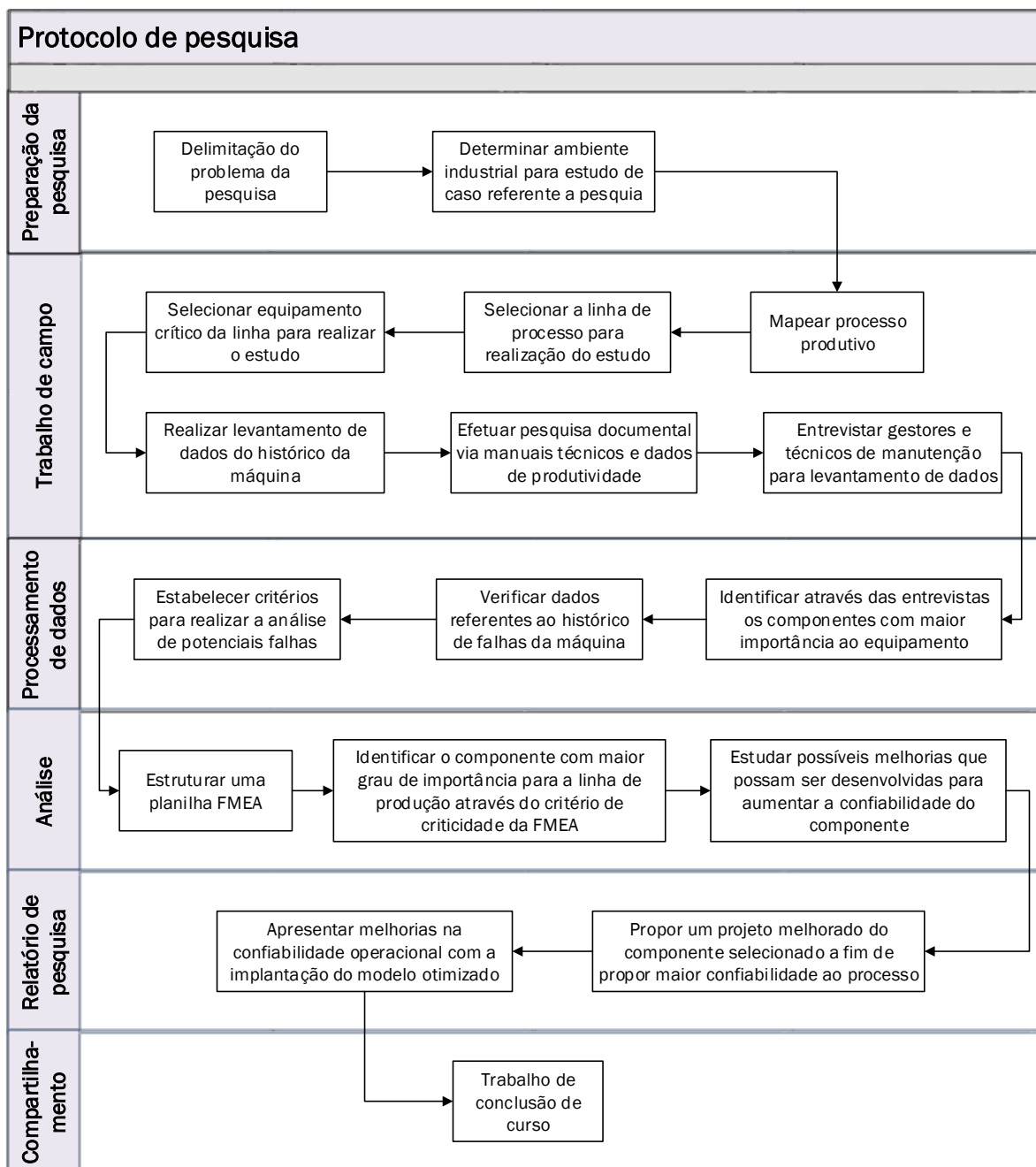


Figura 4 - Protocolo de pesquisa
Fonte: Autoria própria

- Selecionar a linha de produção para desenvolvimento do estudo de caso para a melhoria de determinado componente integrante de uma das máquinas da linha, que possua maior criticidade ao processo. Para isso, realizar levantamento do histórico da máquina de estudo, assim como entrevistar os responsáveis pela manutenção.
- Processamento de dados: nesta etapa, determinam-se as potenciais falhas que poderiam ocorrer nos principais subsistemas da máquina de carda, e

através da ferramenta FMEA, identificar seus impactos na linha de produção.

- Análise: nesta etapa, é avaliado os resultados obtidos através da análise da FMEA e verificado o histórico de intervenções da máquina de carda, para determinar um componente que apresente maior criticidade a linha de produção, para posterior simulação do mesmo através da CAE e desenvolvimento de um projeto melhorado do componente.
- Comunicação da pesquisa: através da otimização do projeto do componente selecionado, demonstrar melhorias na disponibilidade operacional do equipamento, propondo a fabricação e a utilização do novo componente.
- Divulgar os resultados em eventos da área de Engenharia Mecânica.

4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE CASO

4.1 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

As informações para o estudo de caso foram coletadas por meio de visita realizada à empresa têxtil e entrevista com o responsável pela manutenção e operação, os mesmos descreveram como o processo ocorre, percorrendo os diversos setores do processo produtivo de fios de algodão.

Esta pesquisa fundamenta-se na análise de componentes mecânicos rotativos de uma das máquinas inseridas na linha de produção da fábrica de fios de algodão. O equipamento, denominado máquina carda TC, foi selecionado para efetuar o estudo. Após identificar os componentes do equipamento utilizando a ferramenta FMEA, objetiva-se identificar um componente primordial no funcionamento da máquina para simular fenômenos mecânicos por meio de programas de CAE, que recomendem a implantação ou melhoria no componente, assim, será possível obter maior confiabilidade e por consequência, maior disponibilidade ao processo de cardagem.

Para a aplicação da proposta deste trabalho, serão seguidas as seguintes etapas:

- I. Descrição do processo produtivo de fios de algodão, e justificativa da escolha da Máquina Carda TC para estudo;
- II. Análise da metodologia de manutenção da confiabilidade do sistema empregada pela equipe de manutenção da fábrica têxtil;
- III. Verificação dos elementos e componentes críticos da máquina, os quais serão foco do estudo;
- IV. Aplicação da ferramenta FMEA, identificação do componente crítico ao processo para posterior simulação utilizando a CAE.

Para melhor entendimento do processo produtivo da empresa, a Figura 5 apresenta o *layout* do setor manufatureiro, no qual a máquina de cardagem está inserida.

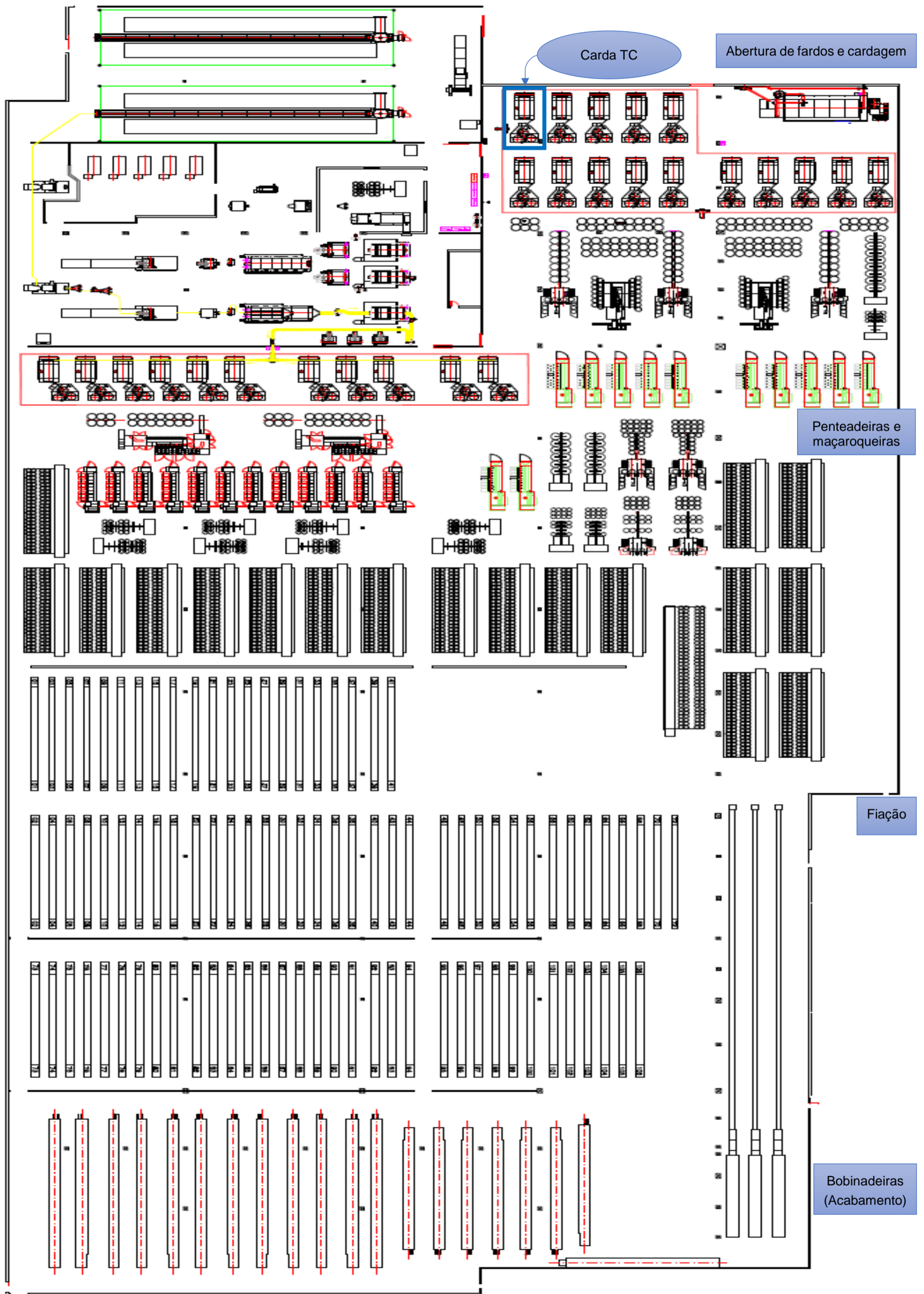


Figura 5 – Layout da linha de produção
Fonte: Arquivos da empresa

A máquina carda TC, identificada na cor azul na Figura 5, está inserida na parte inicial do processo de manufatura do algodão. É responsável pela limpeza mecânica e alinhamento das fibras, assim como pelo início do processo de estiramento e torção, princípios destinados a obtenção das qualidades finais dos diversos tipos de fios.

4.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE FIOS DE ALGODÃO

Segundo a descrição do processo pelo responsável da empresa, e também seguindo o documento intitulado: “Materiais e Processos Têxteis”, elaborado por Gislaine de Souza Pereira (2009), o processo inicia-se com a remoção de pequenas camadas de algodão dos fardos, que contém de 200 a 230 kg de matéria-prima, e através de tubos transportadores o algodão segue para a etapa de batimento, processo este destinado à remoção de impurezas, que consistem de cascas, galhos, folhas, areia e barro, entre outras.

A terceira etapa do processo fica por conta das máquinas de cardagem. O principal objetivo da cardagem consiste em separar as fibras umas das outras, libertando-as das impurezas que ainda possam estar na matéria-prima. A carda possibilita ainda uma mistura mais homogênea das fibras.

Posteriormente na etapa de cardagem, as fitas de algodão seguem para os passadores, que possuem a função de uniformizar o peso por unidade de comprimento, paralelizar as fibras através da estiragem e mistura. A uniformização da qualidade é obtida por meio da mistura de várias fitas de carda para a obtenção de uma nova. Este processo é realizado com a passagem das várias fitas (4, 8 ou 16) por um sistema de junção, com posterior estiramento e torção, para obtenção de fitas com melhor uniformidade. O processo finaliza-se com as etapas de fiação (dar a forma final aos fios) e acabamento dos fios.

A linha de produção é estruturada de tal modo que não possui um equipamento gargalo que causaria a parada da linha caso viesse a falhar (apenas a subestação de energia), mas dentro de cada setor existem alguns equipamentos gargalos (equipamento que para a linha de produção). Para reduzir o risco, a empresa possui pontos de estoque de material, o que permite suportar a parada de algumas

linhas por algum tempo. Em alguns casos, pode-se remanejar a produção para um consumo mais baixo.

Para prevenir falhas nos equipamentos, a empresa preocupa-se em efetuar várias limpezas preventivas, paradas programadas de 2 horas por semana, a fim de evitar sobrecarga em elementos devido ao acúmulo de fibras e poeira do algodão. Com este cuidado, estima-se um ciclo preventivo de até 3 anos, para a substituição das guarnições das cardas TC's, as quais possuem o maior custo de manutenção, na qual, a troca das guarnições é de aproximadamente R\$12.000/máquina e são necessários 2,5 dias de parada.

Logo, este equipamento torna-se referência para efetuar o estudo de melhoramento de projeto de seus componentes mecânicos. A Figura 6 ilustra o interior da máquina de carda.



Figura 6 - Vista interna da máquina Trützschler carda TC
Fonte: Catálogo da Trützschler

Segundo informações disponibilizadas pelo setor de manutenção da empresa, atualmente não se encontram métodos de monitoramento dos equipamentos. A prevenção das falhas é feita através do cumprimento das preventivas recomendadas pelos fabricantes das máquinas utilizadas nas linhas.

Este cenário provoca a necessidade de estoques de peças de reposição sobressalentes, devido a imprevisibilidade da condição de operação dos componentes mecânicos dos equipamentos. Fator este negativo à empresa, que por exemplo a estocagem de guarnições da máquina carda TC, possuem alto custo (em média R\$12.000 por guarnição de máquina) e ainda despendem um logo tempo para serem substituídas.

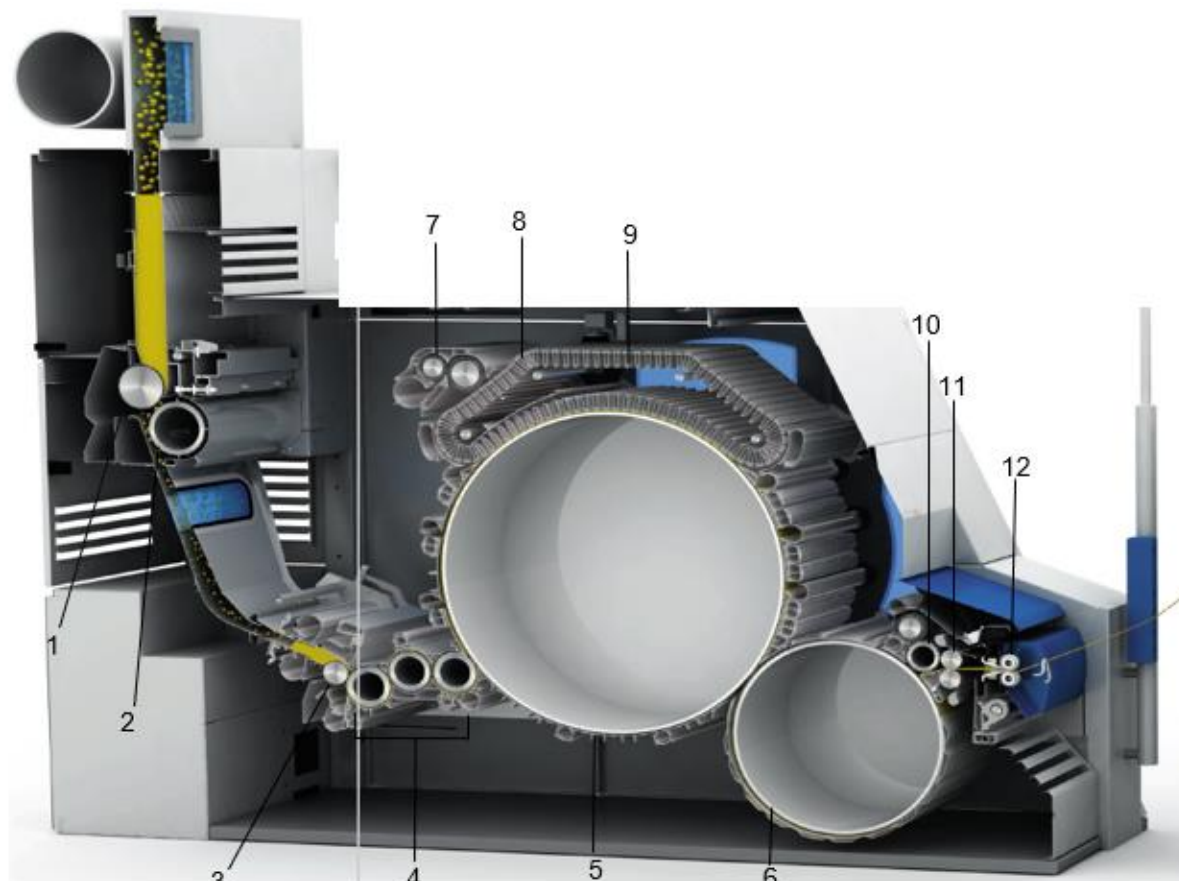
E como o setor industrial atual não possibilita paradas prolongadas das linhas de produção, ocasionadas por quebras de máquina, a empresa depende de estoques de peças sobressalentes, pois além do tempo de parada ocasionado pela remoção e posterior substituição dos componentes, haveria ainda o tempo acarretado pela logística de obtenção da peça, que muitas vezes pode demorar dias ou até semanas dependendo da localização do fornecedor de tal componente.

4.3 COMPONENTES ROTATIVOS DA MÁQUINA CARDA TC

Esta seção destina-se a apresentar os principais componentes mecânicos da máquina de carda, que serão analisados usando a FMEA, e o princípio de funcionamento da carda, segundo o catálogo disponibilizado pela Trützschler.

A Figura 7 representa a ilustração do princípio de funcionamento da máquina de carda, demonstrando seus principais subsistemas e também provendo uma visualização da entrada da matéria-prima e saída da fita de algodão cardada.

Como o objetivo do trabalho é analisar os principais componentes rotativos do equipamento, a máquina de carda dispõem de diversos cilindros para efetuar a cardagem das fibras de algodão, estes dispositivos tornaram-se foco do estudo devido ao alto custo da substituição de suas guarnições.



- | | |
|---|---|
| 1 – Cilindro alimentador | 7 – Dispositivo de limpeza dos flats de 2 cilindros |
| 2 – Cilindro de abertura | 8 – Correia dentada para engate das barras de flats |
| 3 – Cilindro de alimentação | 9 – Barras de flats |
| 4 – Unidade de pré-abertura com 3 cilindros | 10 – Cilindro separador |
| 5 – Tambor | 11 – Cilindros esmagadores |
| 6 – Cilindro do doffer | 12 – Cilindros de descarga |

Figura 7 - Representação esquemática dos principais subsistemas da máquina de carda
Fonte: Catálogo da Trützschler

A unidade de alimentação de flocos de algodão (Figura 8) tem como finalidade alimentar a máquina de carda com a matéria-prima, através da aspiração do material fibroso da instalação de abertura de fardos. O cilindro alimentador (15), com o auxílio da cuba segmentada (16) pressionada por uma mola, faz com que o material seja apertado para assegurar um fluxo otimizado do algodão através da largura completa do silo.

Caso o cilindro alimentador apresente qualquer avaria, seja de folga, desgaste, desbalanceamento ou inconformidades na lubrificação, poderá executar sua função fora do conforme, acarretando em irregularidades na alimentação do material. Se proporcionar uma alimentação de algodão superior ao processado pela máquina,

poderá acarretar em parada do processo de cardagem por entupimento do equipamento, por exemplo.

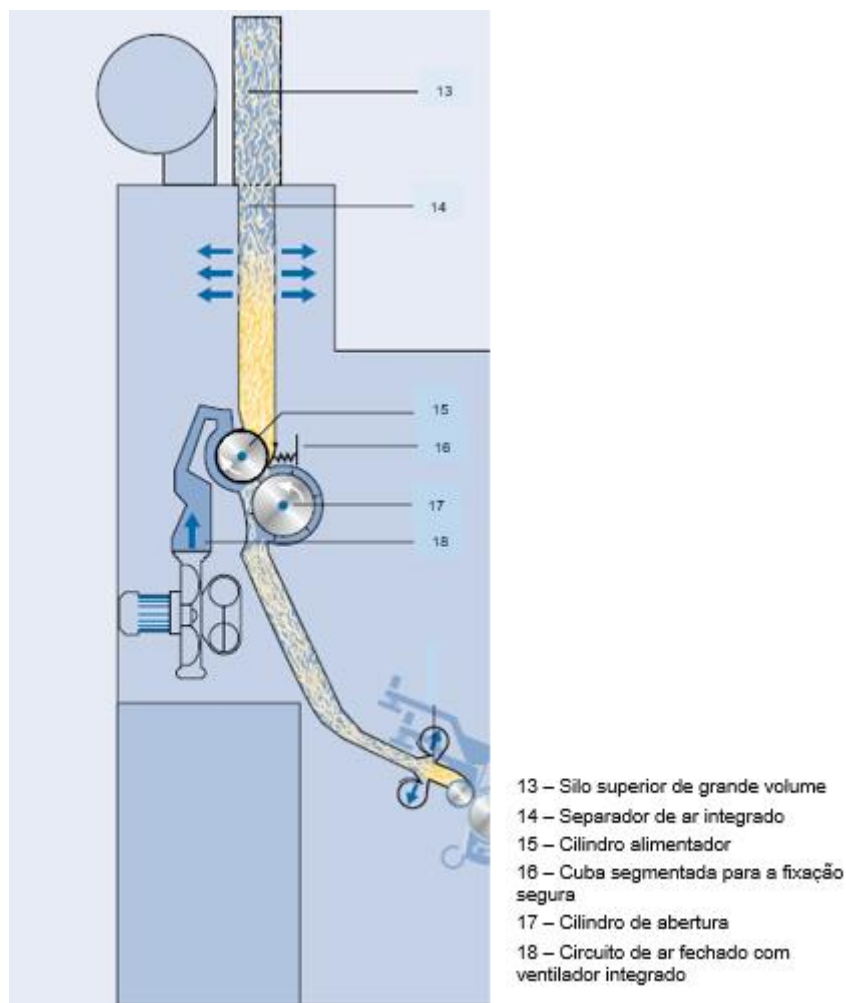


Figura 8 - Sistema alimentador de flocos
 Fonte: Catálogo da Trützschler

Não diferente, o cilindro de abertura (17) que tem como função efetuar a abertura uniforme do material e o ventilador (18) que assegura uma compressão regular no silo inferior, se providos de quaisquer inconformidades em seu funcionamento, também poderão acarretar em parada do processo de cardagem.

Passado pelo sistema de alimentação de flocos, o velo de algodão chega ao sistema de entrada da carda (Figura 9), que é composto pelo cilindro de alimentação (19), mesa de alimentação (20) e a alavanca de medição (21). A mesa de alimentação comprime o velo fibroso e o conduz aos elementos de mola. A alavanca de medição é utilizada para a regulação da rotação do cilindro.

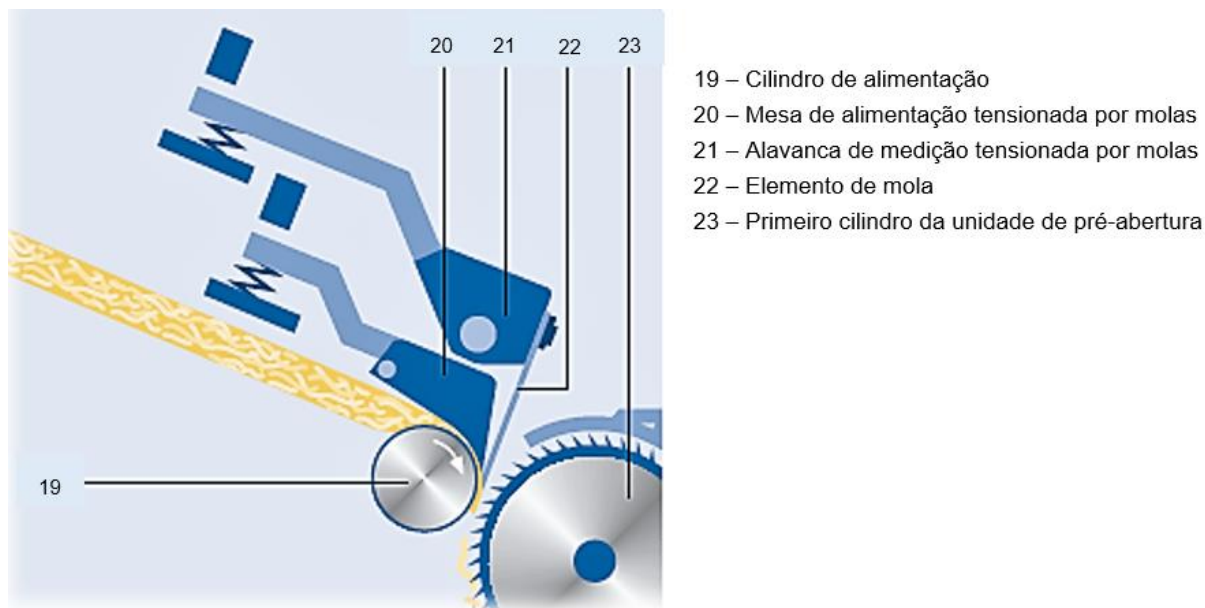


Figura 9 - Sistema de entrada da carda
 Fonte: Catálogo da Trützschler

Este sistema também é responsável pela detecção de peças metálicas e pontos grossos no velo. Uma detecção causa uma parada imediata da carda, e mediante uma ligação de inversão pode-se operar o cilindro de alimentação em direção oposta, de maneira que se possa retirar os corpos estranhos antes de eles causarem danos à máquina.

A unidade de pré-abertura (Figura 10), é composta por três cilindros (24, 25 e 26) que possuem a função de abertura e limpeza das fibras de algodão, possibilitando regular o grau de limpeza necessário pela manipulação da faca (27).

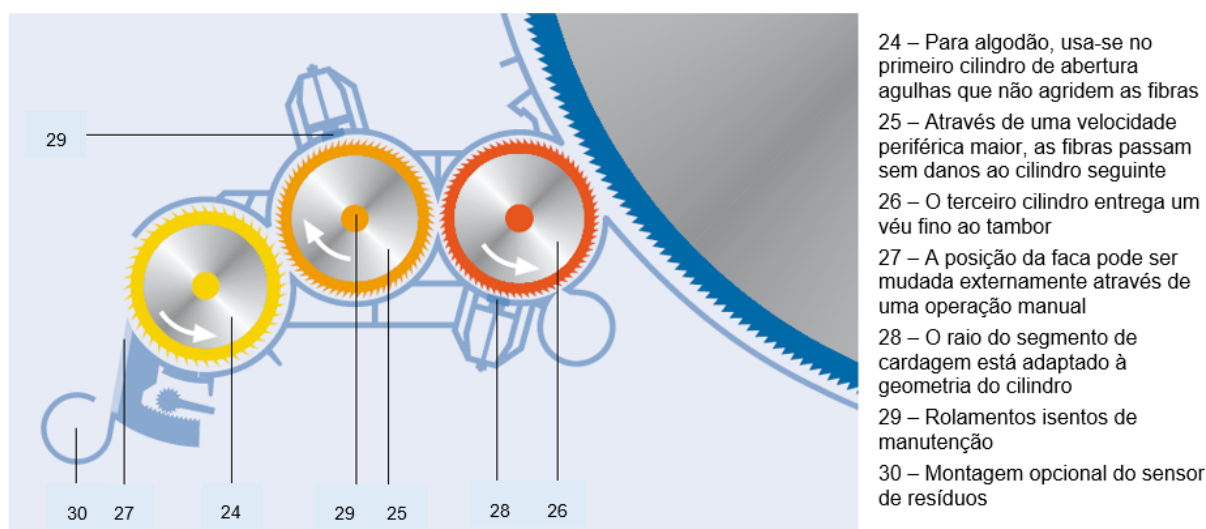
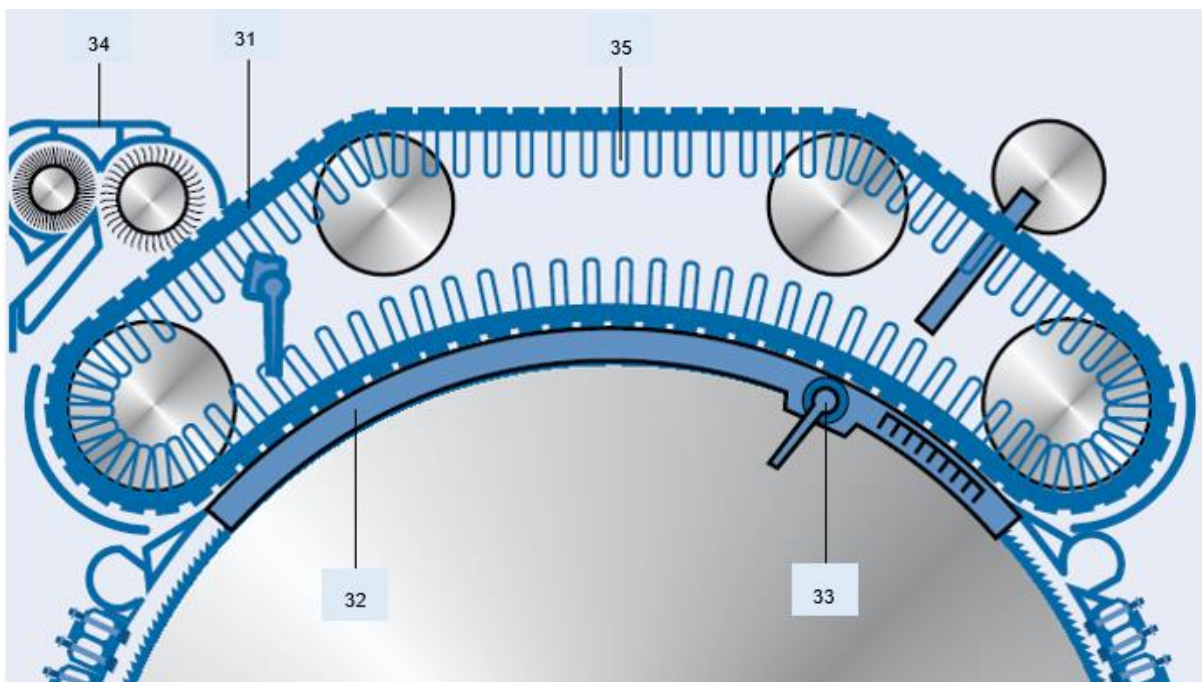


Figura 10 - Unidade de pré-abertura
 Fonte: Catálogo da Trützschler

O bom funcionamento do sistema de pré-abertura de três cilindros é de fundamental importância para que não haja agressão as fibras. A entrega de um véu fino e uniforme ao tambor faz com que a eficiência de cardagem nos principais pontos de trabalho (entre tambor e flats) seja maior, assim, maximizando a produção.



- 31 – Correia dentada especial com pinos para fixar as hastas de flats
- 32 – Arco flexível de precisão com 6 pontos de ajuste
- 33 – Sistema de ajuste de flats
- 34 – Dispositivo de limpeza de flats de 2 cilindros
- 35 – Hastas de flats de alumínio

Figura 11 - Área do tambor e dos flats móveis
Fonte: Catálogo da Trützschler

O processo de cardagem ocorre entre o tambor e o sistema de flats (Figura 11), onde estes, são leves hastas de alumínio, que necessitam de regulagem precisa para que não fiquem nem próximas demais do tambor ocasionando desgaste da guarnição, e nem longe demais acarretando em má qualidade do produto cardado, onde, o material alimentado pela unidade de pré-abertura é aceito na área de pré-cardagem do tambor e conduzido à área dos flats. A cardagem acontece entre a guarnição do tambor e os flats móveis de rotação contrária. Após, o tambor transfere as fibras paralelizadas e limpas para a guarnição do cilindro do doffer, onde este, é um cilindro que possui velocidade periférica muito menor que o tambor e tem a função de recolher as fibras do tambor.

O último sistema do processo de cardagem, Figura 12, fica por conta do cilindro do doffer (36) aceitar as fibras do tambor e formar o velo de fibras. Em seguida, o cilindro destacador (37) tira o velo do cilindro do doffer e transporta-o aos dois cilindros compressores (38). Dentro do funil (41), o velo é transformado numa fita cardada, a qual é retirada pelos cilindros de descarga (42).

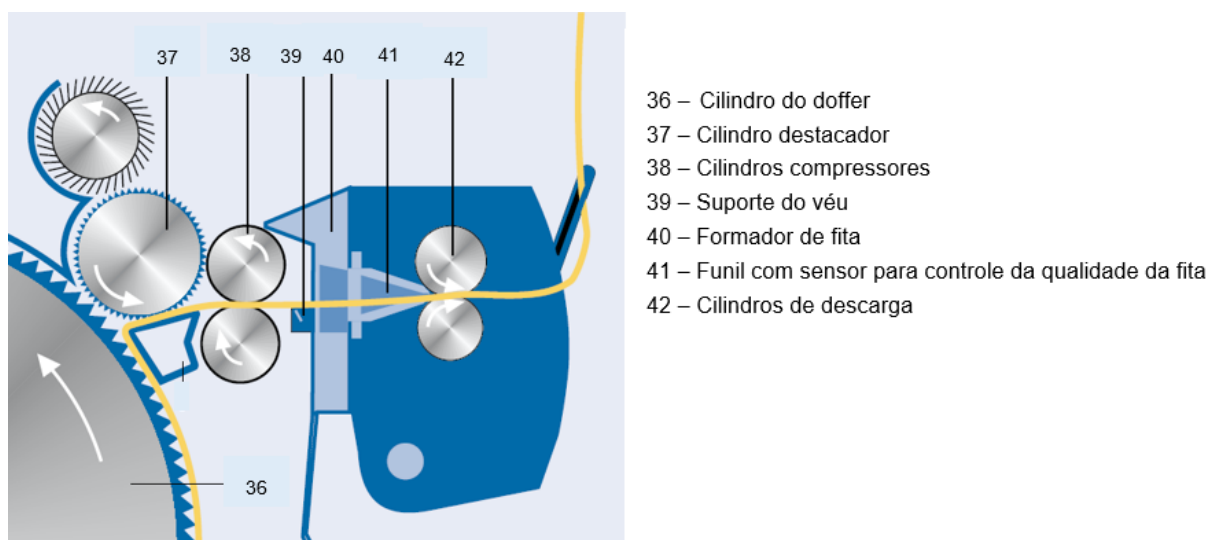


Figura 12 - Área do doffer e saída da fita cardada
Fonte: Catálogo da Trützschler

Todos os subsistemas descritos, são compostos pela combinação de cilindros rotativos e algum outro dispositivo plano ou até outro cilindro para efetuar determinado processo requerido.

A conservação do jogo de cilindros que compõem o processo de cardagem é de fundamental importância para garantir a qualidade das fibras de algodão ao fim do processo de confecção de fios, pelo fato de ser responsável pela limpeza mecânica e alinhamento das fibras, assim como pelo início do processo de estiramento e torção, princípios destinados à obtenção das qualidades finais dos diversos tipos de fios.

Por isso, somente a aplicação de um plano preventivo orientado para tais dispositivos para evitar agressões às fibras, degradações ao equipamento ou substituição das guarnições dos cilindros antes do fim do seu ciclo de vida útil devido ao alto custo acarretado, não são o bastante se houver alguma deficiência de projeto nos componentes mencionados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 APLICAÇÃO DA FERRAMENTA FMEA PARA DETERMINAR O COMPONENTE CRÍTICO

A aplicação da ferramenta FMEA foi desenvolvida através da análise do comportamento funcional da máquina de carda TC. Os elementos selecionados, foram devido ao levantamento dos dispositivos envolvidos diretamente na cardagem das fibras de algodão, ou seja, dos cilindros que compõem o processo.

Selecionados os dispositivos rotativos da máquina de carda, elaborou-se o estudo de componente a componente para levantar as principais causas, efeitos ao equipamento e a consequência que geraria ao processo de cardagem, por meio do critério de severidade, ou seja, identificar a gravidade da falha de um elemento para com o funcionamento correto da máquina, fazendo-se uso da estrutura de FMEA.

O Quadro 2, a seguir, traz o histórico de manutenção da máquina de carda, efetuadas nos últimos 10 anos. Todas as substituições de componentes foram realizadas de forma preventiva e corretiva, ou seja, seguindo um ciclo pré-determinado para que houvesse intervenção no equipamento.

Como comentado anteriormente, a substituição das guarnições dos cilindros estudados, despendem um investimento de aproximadamente R\$ 12.000 e 2,5 dias de trabalho.

Seguindo o Quadro 2, podemos observar que determinados componentes são substituídos com intervalos inferiores a 6 meses de trabalho. Mesmo a empresa seguindo recomendações de manutenção preventiva oriundas do fabricante, como rotas de lubrificação, não estão sendo o suficiente para promover confiabilidade aos componentes.

Como será comentado mais adiante, o componente que possui a maior criticidade ao equipamento é o tambor. O mesmo, possui aproximadamente 1,3 metro de diâmetro com uma largura de trabalho de mais de 1 metro. Disto, resulta uma superfície para ser envolvida com guarnição acima de 4 m².

Equipamento: <u>Carda TC</u> Nº: <u>1</u> Local: <u>F1</u>														
Trabalho	Data de Efetivação [mês/ano]										Previsão [mês/ano]			
	04/13	10/13	04/14	10/14	07/15	04/16	12/16	08/17			04/18	12/18	08/19	04/20
Troca de Guarnição Cassete Twin Top											04/18	12/18	08/19	04/20
											12/20	08/21	05/22	01/23
Troca de Guarnição Flat Fixo Pré-Cardagem	11/12	04/13	02/14	12/14	12/15	12/16					12/17	12/18	12/19	12/20
Troca de Guarnição Flat Fixo Pós-Cardagem	02/11	04/13	05/15	05/17							05/19	05/21	06/23	06/25
Troca de Guarnição Guarnição do Tambor	10/08	03/12									03/16	04/20	05/24	06/28
Troca de Guarnição Guarnição de Doffer	10/08	08/12									09/17	10/22	11/27	12/32
Troca de Guarnição Guarnição de Flats	10/08	03/12	04/16								04/20	05/24	06/28	07/32
Troca de Guarnição Webfeed	12/10	07/13	07/16								07/19	08/22	08/25	09/28
Troca de Guarnição Segmentos Cardados	03/11	05/13	08/15								10/17	12/19	03/22	05/24
Troca de Guarnição Limpeza dos Flats	10/08	02/12	06/15								10/18	03/22	08/25	12/28
Troca de Guarnição Strip de Flat	10/08	02/12	06/15								10/18	03/22	08/25	12/28
Troca de Guarnição Cilindro Separador	10/08										12/18	02/29	04/39	06/49
Troca de Guarnição Cilindro DFK	10/08										08/20	07/32	05/44	04/56
Troca de Guarnição Stripping	10/08	02/12	06/15								10/18	03/22	08/25	12/28
Retífica de Guarnição Tambor	08/13	12/13	05/14	10/14	05/15	11/15	04/16	10/16	04/17		10/17	04/18	10/18	04/19
											10/19	04/20	10/20	04/21
Retífica de Guarnição Doffer	08/12	08/13	08/14	05/15	07/16	07/17					07/18	07/19	07/20	07/21
Retífica de Guarnição Flat Circulante	08/13	12/13	05/14	10/14	05/15	11/15	04/16	10/16	04/17		10/17	04/18	10/18	04/19
											10/19	04/20	10/20	04/21
Troca de Correia Sincronizada Cilindro Descarga	10/10	10/12	10/14	10/16							10/18	10/20	11/22	11/24
Troca de Óleo Motorreductor	10/08	08/14									02/20	08/25	02/31	08/36
Lubrificação Cilindro Descarregador	11/12	06/13	01/14	08/14	03/15	10/15	05/16	12/16	07/17		02/18	09/18	04/19	11/19
											06/20	01/21	08/21	04/22
Lubrificação Doffer	10/12	10/13	10/14	10/15	10/16						10/17	10/18	10/19	10/20
Lubrificação Cilindro	10/12	10/13	10/14	10/15	10/16						10/17	10/18	10/19	10/20
Verificar Tensão das Correias	05/13	09/13	01/14	05/14	09/14	01/15	05/15	09/15	01/16		01/18	05/18	09/18	01/19
	05/16	09/16	01/17	05/17	09/17						05/19	09/19	01/20	05/20
Trocar correia dos flats	10/15										11/20	12/25	01/31	02/36

Quadro 2 - Histórico de manutenção máquina de carda
Fonte: Adaptado dos arquivos da empresa

A substituição das guarnições da máquina de carda, geralmente, ocorrem devido a desgastes provenientes das funções requeridas do equipamento ao componente envolvido pela guarnição. Caso este componente encontre-se desbalanceado, com folgas, acentuará ainda mais o desgaste das guarnições e assim, acarretando na substituição das mesmas em intervalos ainda menores.

Portanto, com a realização de melhorias de projeto no componente crítico selecionado através da FMEA, buscará a elevar estes tempos de intervenções para substituição ou reparações dos componentes.

O Apêndice A, apresenta o desenvolvimento da FMEA considerando os principais dispositivos do equipamento de carda descritos anteriormente. A planilha em questão, foi desenvolvida primeiramente analisando individualmente cada componentes da máquina de carda, sua função requerida, o modo de falha que pode vir a ocorrer, a causa que ocasionou a falha e sua implicação no funcionamento do equipamento.

Posteriormente, reunindo-se com a equipe responsável pela manutenção do equipamento, foi julgado segundo o critério estabelecido no Quadro 3 o grau de severidade que cada componente possui ao equipamento caso venha a entrar em falha funcional.

Severidade	Critério: Gravidade do efeito na operação da máquina	Peso
Muito alto (Catastrófico)	Qualquer evento que possa causar a perda da(s) função(ões) primária(s) da máquina, resultando em danos significativos para a máquina ou processo produtivo, seu ambiente, e/ou gerar a perda de vida ou amputação.	4
Alta (Crítica)	Qualquer evento que possa causar a perda da(s) função(ões) primária(s) da máquina, resultando em danos significativos para a máquina ou ao seu processo produtivo, seu ambiente, mas risco insignificante para a vida ou membros humanos.	3
Moderado (Limite)	Qualquer evento que ocasione degradação a(s) função(ões) de desempenho do sistema, mas sem dano apreciável à máquina ou vida ou membro humano.	2
Baixo (Insignificante)	Qualquer evento que poderia causar a degradação da(s) função(ões) de desempenho da máquina, resultando em danos insignificantes à própria máquina, processo produtivo ou ao seu ambiente, mas nenhum dano à vida ou aos membros humanos.	1

Quadro 3 - Escala para avaliação dos efeitos dos modos de falha
Fonte: Lira (2017)

Caso venha entrar em falha funcional, o ventilador é o dispositivo inserido na máquina que menos impactaria em seu funcionamento, apresentando grau de severidade 2.

Com grau de severidade 3, apresentam-se o maior número dos cilindros estudados. Estes, caso venham a entrar em falha funcional, ocasionariam apenas danos leves ao equipamento, onde este contém uma tecnologia de detecção de adversidades no seu funcionamento, interrompendo o processo imediatamente para proteção da máquina e das pessoas que a operam.

Porém, mesmo com a tecnologia de interromper o processo ao detectar adversidades no seu funcionamento, a máquina ainda apresenta probabilidade de sofrer danos mais graves. Ganhando conceito de severidade 4, o mais alto segundo o Quadro 3, o cilindro do doffer, o tambor e os cilindros de limpeza dos flats foram considerados os mais críticos para a máquina.

Estes dispositivos, caso venham entrar em falha funcional, podem atritar um contra o outro, gerando calor e possivelmente provocarão um início de incêndio no equipamento. Como a matéria-prima base da empresa é o algodão, substância altamente inflamável, a proliferação das chamas poderia ser alta, ocasionando sérios danos a empresa.

Após a análise do critério de severidade dos componentes, caracterizaram-se 3 como sendo críticos ao maquinário, recebendo valor máximo. Posteriormente, para os três elementos críticos, realizou-se uma relação de cada causa potencial do modo de falha com os principais sintomas que um elemento mecânico apresenta, os quais são: temperatura, Propriedades do lubrificante, Vibração, Vazamento de fluido, Ruído, Medidas de comprimento, Pressão, Velocidade (LIRA, 2017).

Diagnóstico	Critério: Identifica sintomas de modos de falha	Escala
Muito alto	É praticamente certo de que o diagnóstico do modo de falha será preciso	5
Alto	Existe uma grande probabilidade de que o diagnóstico de modo de falha será preciso	4
Moderado	Existe uma probabilidade moderada de que o diagnóstico do modo de falha seja preciso	3
Baixo	Existe uma baixa probabilidade de que o diagnóstico do modo de falha seja preciso	2
Remoto	Existe uma probabilidade remota de que o diagnóstico do modo de falha seja preciso	1

Quadro 4 - Escala para avaliação do grau de diagnóstico
Fonte: Lira (2017)

Dentre os sintomas presentes, vibração, temperatura e ruído foram os apontados como sendo os causadores dos modos de falhas apresentados na FMEA. Para tais sintomas, utilizando o critério estabelecido no Quadro 4, foi designado

determinado grau na detecção da avaria estar ocorrendo. Se tal for de fácil diagnóstico, recebe grau 5, e se difícil 1.

Com tal escala, pode-se chegar a valores de detecção dos sintomas ruído e temperatura como sendo 4, de alto diagnóstico. Estes podem facilmente ser ouvidos (ruídos) e sentidos (temperatura), podendo intervir e prevenir a falha funcional do elemento mecânico.

Já para a vibração, a qual é uma das maiores causadoras de falha no funcionamento dos ativos físicos, a detecção das mesmas não é tão simples. Cada equipamento apresenta uma frequência natural de vibração, e diferenciar esta vibração normal de uma que causará problemas ao equipamento, muitas vezes, é apenas detectável através de instrumentos específicos.

Portanto, este sintoma foi classificado como sendo de grau 3 de detecção para o maior número dos modos de falhas, o qual existe uma probabilidade moderada de que o diagnóstico do modo de falha seja preciso. Sendo assim, como sua detecção é menos precisa que os sintomas citados anteriormente, ganha o foco para ser tomado como referência na escolha do componente rotativo para estudo.

Analisando os modos de falhas que apresentavam como sintoma a vibração, pôde-se classificar o eixo de acionamento do tambor (Figura 13) com a menor probabilidade de que o diagnóstico de falha seja preciso (grau 2). Como o tambor possui tamanho elevado, aproximadamente 1,3 metro de diâmetro, acaba dificultando a percepção da falha do eixo.

Por este fato e também por possuir maior área a ser coberta pela guarnição, e contendo função de maior importância para o processo de cardagem das fibras de algodão, foi indicado pelo pessoal da manutenção para realizar o estudo de projeto utilizando elementos finitos através de programa CAE, apresentando os resultados adiante.

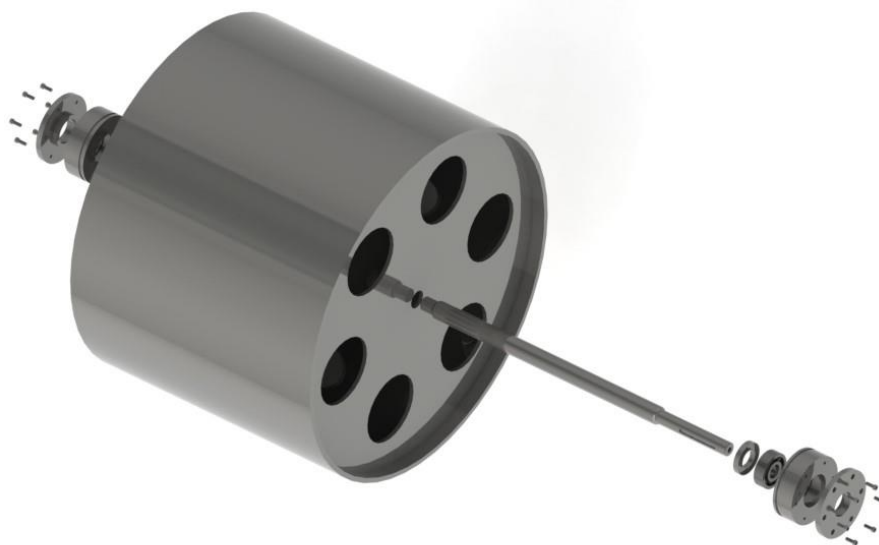


Figura 13 – Vista explodida do modelamento do tambor
Fonte: Autoria própria

5.2 ANÁLISE DO ELEMENTO SELECIONADO

No caso do eixo da máquina de carda, a força de interesse para estudo através de simulação seria a de torção, pois o componente tem como função receber torque da relação de polias e transmitir ao tambor.

Para o cálculo do torque transmitido pelo motor de 7,5 kW de potência, ao eixo que possui uma velocidade angular de 477 rpm (rotações por minuto), fez uso da seguinte equação:

$$T = \frac{9550 * P}{\omega} \quad (1)$$

Onde:

T = Torque em N·m

P = Potência em kW

ω = Velocidade angular em rpm

Aplicando os valores à fórmula obtemos:

$$T = \frac{9550 * 7,5 \text{ kW}}{477 \text{ rpm}} = 150 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2)$$

Posteriormente, utilizou-se da relação da velocidade angular com a escalar:

$$V = \omega * R \quad (3)$$

para se obter a força que a polia aplica ao eixo através da relação:

$$F = \frac{P}{V} \quad (4)$$

que, substituindo (3) em (4), obtemos:

$$F = \frac{P}{\omega * R} \quad (5)$$

aplicando os valores, sendo R o raio da polia movida de diâmetro 0,55 m, obtemos a força F, aplicada a 0,280 m do mancal da direita (Figura 14a):

$$F = \frac{7.500 \text{ W}}{\left(\frac{477}{60}\right) rps * 0,275 \text{ m}} = 3,43 \text{ kN} \quad (6)$$

Através do programa CAD, foi possível estimar a massa do tambor, aproximadamente 930 Kg. Com a massa, pôde ser calculada a força peso que o componente exerce sobre o eixo, 9,1 kN. A região de contato do tambor com o eixo é de 0,92 m, então, seu peso está distribuído uniformemente, resultando em 10 kN/m, como pode ser visualizado na Figura 14b).

Após obter tais dados, calcularam-se os esforços internos do eixo, localizando os picos dos momentos em $x = 0,356 \text{ m}$ e $x = 0,92 \text{ m}$, e com os resultados obtidos foi traçado o diagrama de momentos fletores (Figura 14c).

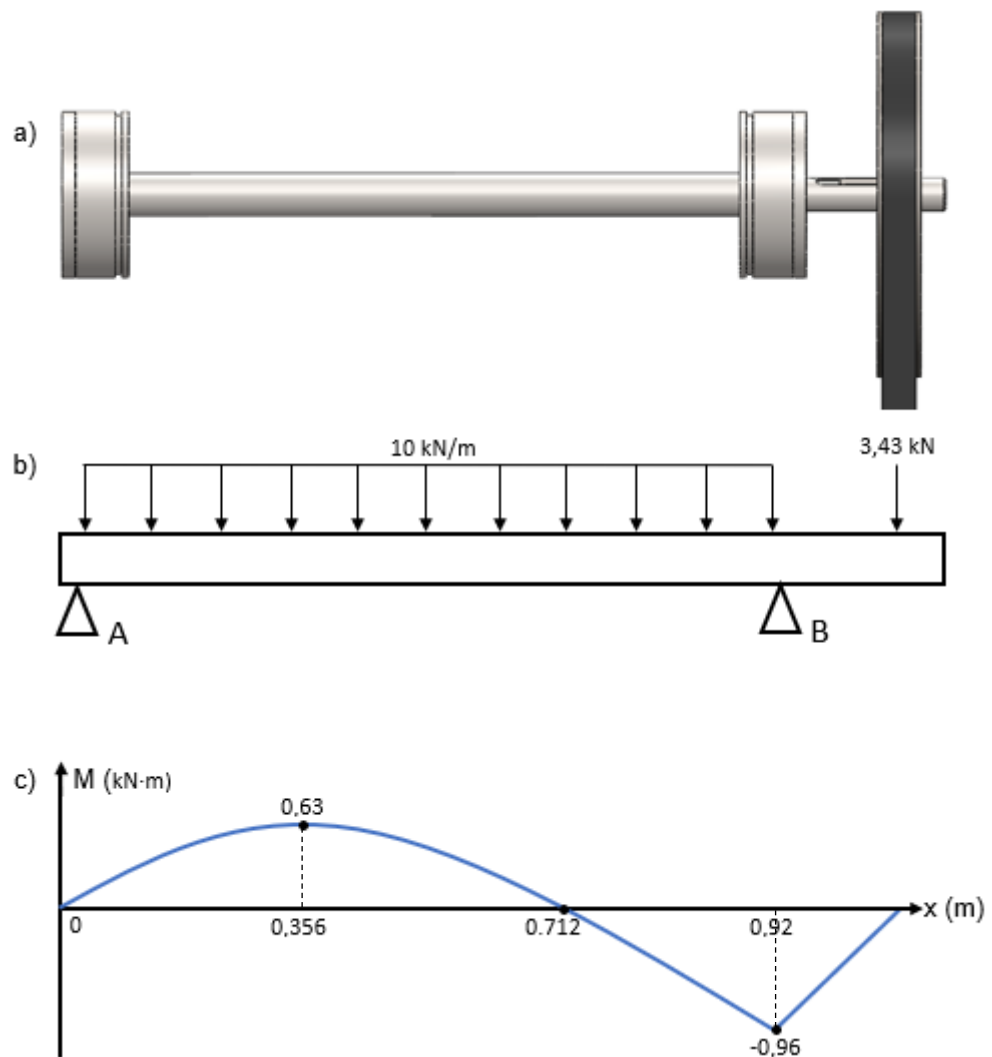


Figura 14 – (a) Esquema de fixação do eixo e polia. (b) Diagrama de corpo livre.
(c) Diagrama de momentos fletores
Fonte: Autoria própria

Após análise de esforços internos do eixo, partiu para análise do modelo através de simulação de torção utilizando CAE em seu estado normal sem alteração, sendo os resultados apresentados na Figura 15. Para estes, utilizou-se como torque 150 N·m, aplicado na região em que é acoplada a polia de tração e fixou a outra extremidade.

Para tal simulação, usou-se inicialmente uma malha grosseira, afim de analisar como o modelo se comporta com o refinamento da malha com o decorrer das simulações. Com tal técnica, busca-se identificar um grau de refinamento no qual não haverá alteração significativa caso faça uso de uma malha mais refinada.

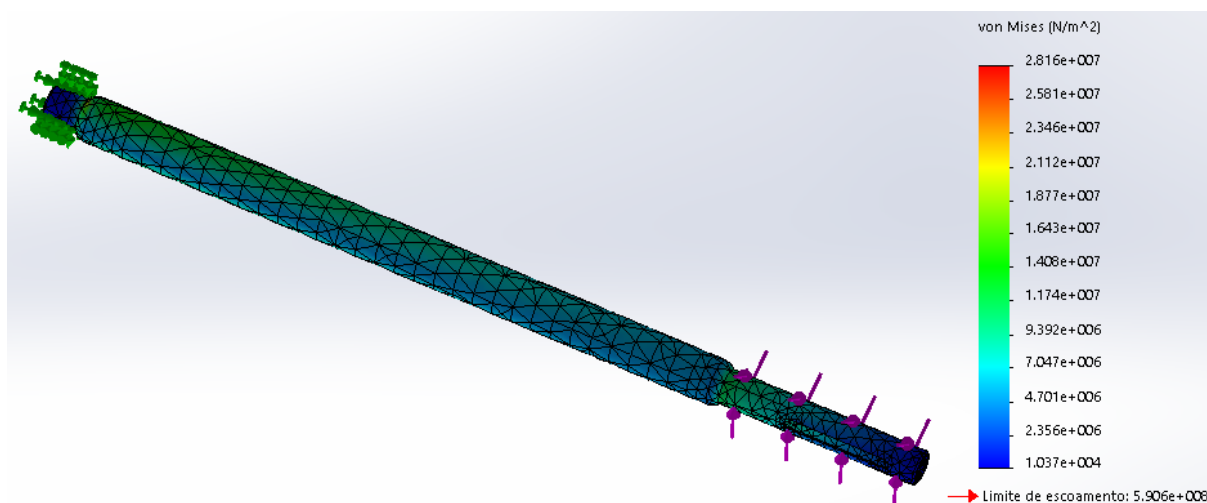


Figura 15 - Simulação estática de flexão-torção utilizando malha grosseira
Fonte: Autoria própria

Como nem sempre uma malha mais fina é a que oferece melhores resultados, utilizar uma malha mais grosseira, porém que gere resultados satisfatórios, acarretará na diminuição de custos de simulação, exigindo menos processamento da máquina utilizada para realizar tal implementação.

Porém, após várias simulações com pequenas variações no refinamento da malha, não se obteve uma convergência satisfatória dos resultados, optando pela utilização da malha mais fina disponibilizada pelo programa de CAE para ser utilizada nas simulações seguintes.

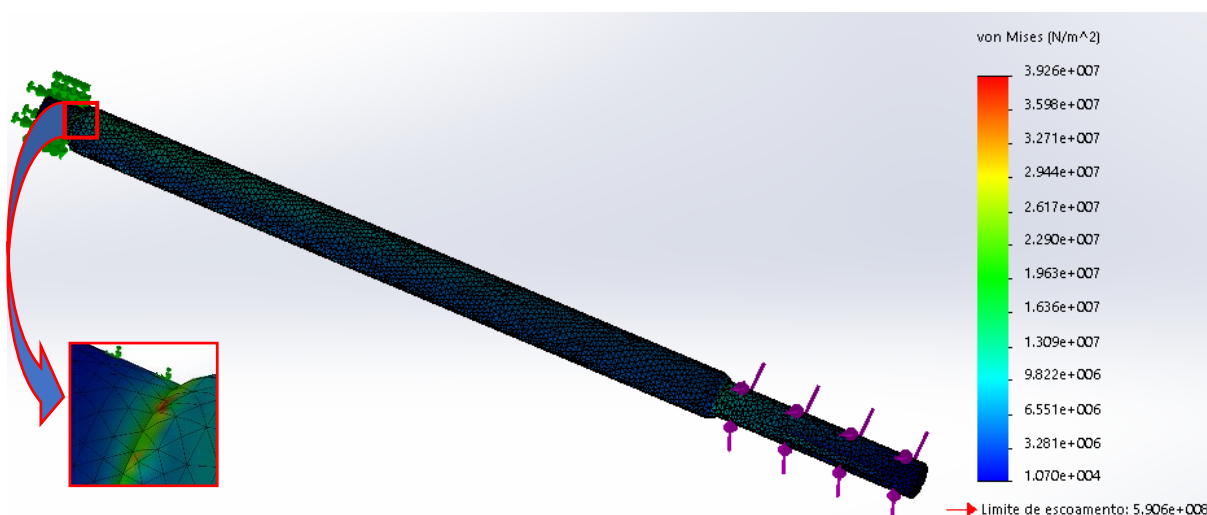


Figura 16 - Simulação estática de flexão-torção utilizando malha refinada
Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 16, podemos observar que a tensão máxima na malha refinada mudou significativamente em relação a malha grosseira (Figura 15).

Para esta análise, o tambor foi modelado em aço-liga (16MnCr5) assim como seu eixo. A simulação estática no modelo original foi realizada para analisar seus pontos a serem melhorados, ou seja, pontos que estejam concentrando maiores tensões. Na imagem podemos observar que em nenhum ponto a aplicação do torque de 150 N·m superou o limite de escoamento do material ($5,906 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$), ou seja, não superou a tensão máxima suportada pelo componente.

O detalhamento da Figura 16 mostra a região de máxima tensão de torção do componente, a qual apresenta-se na coloração avermelhada. Neste ponto devido a condição de geometria, canto vivo, acaba por concentrar maiores esforços. Estes, com o passar do tempo, acabarão por acarretar na falha do eixo.

Posteriormente, removeu-se os cantos vivos do eixo através da aplicação de filetes (Figura 17). A modificação ocorreu nos pontos indicados através das setas em vermelho, e o detalhamento na imagem mostra uma leve acentuação na distribuição das tensões na área em que antes já apresentava a maior concentração de esforços.

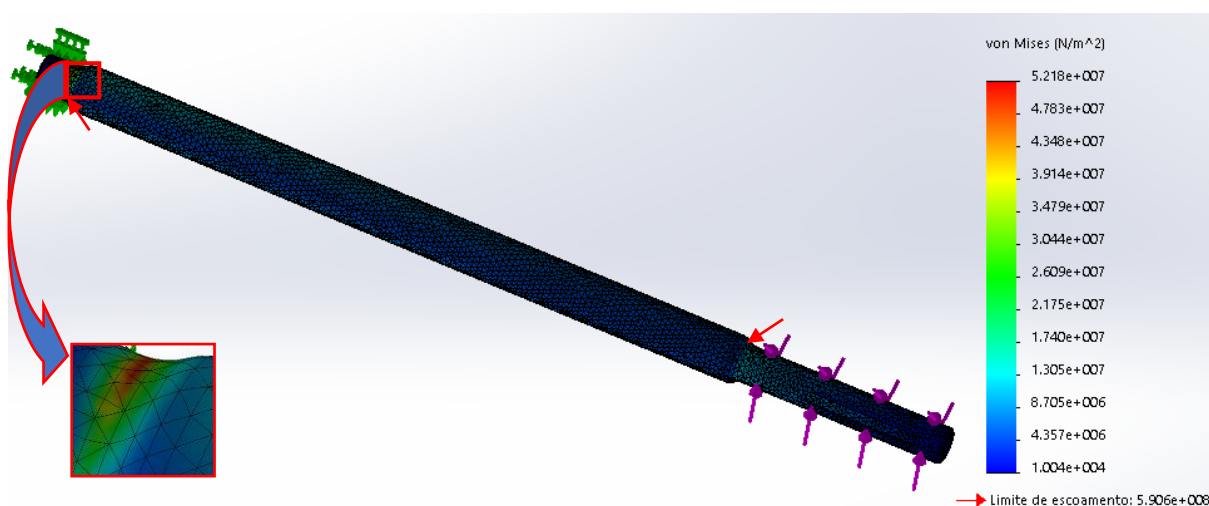


Figura 17 - Simulação estática de flexão-torção com aplicação de filetes nos cantos vivos
Fonte: Autoria própria

Portanto, podemos verificar que a alteração da geometria da peça não trouxe melhorias ao eixo, e sim uma leve piora na condição simulada. Como o estudo visa um novo modelo a fim de viabilizar a implantação do mesmo, mudanças maiores na geometria causaria a substituição de rolamentos e mancais ou outro componente para adequar ao novo modelo, inviabilizando sua utilização.

Assim, o próximo passo será manter o modelo original e modificar as propriedades do aço em que o modelo pode ser fabricado. Por exemplo, a adição de

uma maior concentração de manganês à liga, diminuiria os desgastes ocorridos pelo eixo na operação da máquina de carda.

Mantendo o modelo com geometria original, porém alterando o aço-liga em que ele é fabricado (20MnCr5), resultou nos dados que podem ser visualizados na Figura 18.

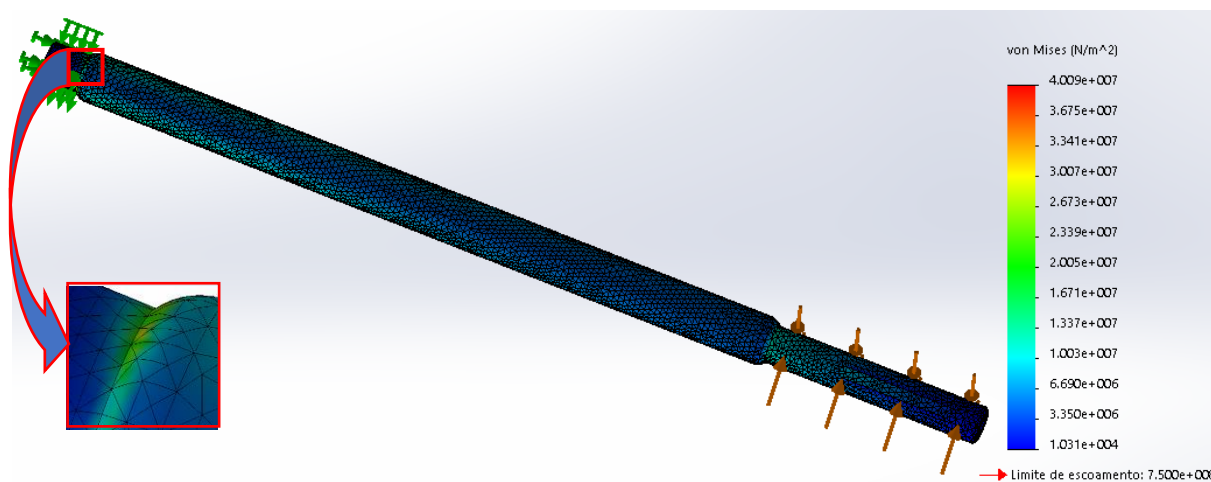


Figura 18 - Simulação estática de flexão-torção utilizando aço-liga 20MnCrS5
Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios em relação aos anteriores. Devido ao material possuir maior limite de escoamento que o anterior ($7,5 \cdot e^8 \text{ N/m}^2$), a simulação apresentou maiores regiões com a coloração azul escura, a qual compreende a menor concentração de tensão. Além disso, o detalhamento da figura mostra que houve consideravelmente diminuição das máximas concentrações de tensões, tons de vermelho e amarelo.

Porém, o uso de uma liga de aço, ficou longe de superar o limite de escoamento aplicando o torque de trabalho da máquina de carda. Neste sentido, vale realizar uma análise utilizando aço carbono comum (aço 1045), o qual possui valor de mercado mais baixo que os aços-liga utilizados anteriormente para realização das simulações.

A Figura 19 traz os resultados obtidos com a realização da simulação de torque utilizando aço 1045. Na imagem, podemos observar que a região que apresentou a maior tensão ($3,964 \cdot e^7 \text{ N/m}^2$), ficou bem longe de extrapolar o limite de escoamento do material que é de $5,3 \cdot e^8 \text{ N/m}^2$. Logo, para dado torque requerido pelo equipamento, pode-se utilizar materiais mais baratos para fabricação do eixo de acionamento do tambor.

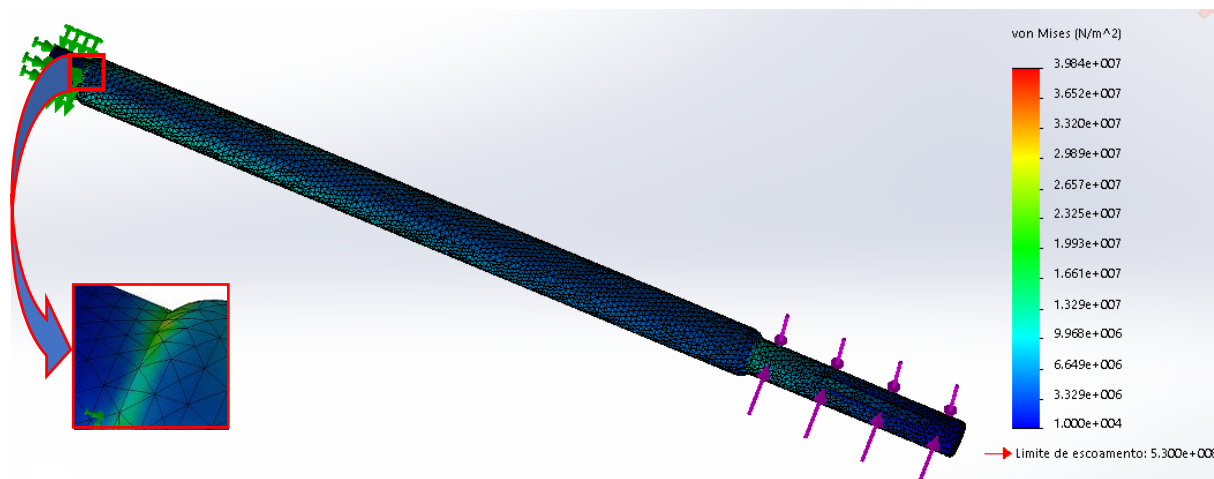


Figura 19 - Simulação estática de flexão-torção utilizando aço carbono 1045
Fonte: Autoria própria

Porém, vale ressaltar, que deve-se realizar uma análise mais detalhada para verificar questões de desgaste do material, assim como, os esforços sofridos no arranque do tambor, considerando sua massa.

Com as simulações de torção realizadas, foi possível observar que pequenas alterações na geometria do eixo não trazem melhorias. Porém alterações maiores acarretariam em situações de substituições de algumas peças da máquina para adequar o novo componente, inviabilizando o investimento.

Portanto, a situação simulada que mais demonstrou perspectivas de melhorias no eixo, foi a aplicação de um material com maior limite de escoamento. Este, diminuiu regiões que apresentavam altas concentrações de tensão, as quais viriam a acarretar falha precoce do modelo.

Contudo, ligas mais elaboradas como a utilizada nas simulações, acarretam na elevação dos custos da fabricação do eixo, como a máquina de carda não se encontra em uma posição crítica da linha de produção, porém proporciona um elevado custo na substituição da sua guarnição, por este motivo, acaba sendo viável um estudo na sua aplicação no equipamento.

Outro fator a favor da implantação do modelo otimizado do eixo utilizando materiais mais elaborados, é a não utilização de manutenção orientada pela empresa de estudo de caso. A utilização de manutenção preventiva, apenas, não é o suficiente para garantir confiabilidade ao componente, tendo como consequência ocorrência de corretivas não planejadas devido a falha do mesmo.

Logo, manutenção corretiva impacta diretamente na diminuição da disponibilidade operacional do equipamento, cenário que se busca evitar atualmente na indústria.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÃO

Como proposto no objetivo geral, este estudo de caso aborda a aplicação da FMEA para determinar um componente crítico do equipamento de cardagem de fios de algodão utilizando como diretriz a metodologia RCM, e após a imposição de simulações através da análise de elementos finitos, formulou-se um novo modelo para o eixo estudado.

A aplicação da simulação através da análise de elementos finitos, mostrou que mudanças na geometria do componente em estudo não trariam grandes melhorias. Isso se deve ao fato da falta da possibilidade de realizar modificações maiores no eixo devido a sua aplicabilidade. Caso necessário realizar grandes modificações no componente para chegar a resultados satisfatórios, poderia acarretar em substituição de outros elementos da máquina, como rolamentos e mancais por exemplo, inviabilizando sua inserção no ativo físico.

Nesse sentido, outro cenário simulado foi a alteração do material de fabricação do eixo. Utilizando ligas de aço com maior limite de escoamento, conseguiu eliminar regiões que antes apresentavam elevadas concentrações de tensões. Este fator determinará uma maior vida útil ao componente, assim sendo, elevaria também sua confiabilidade operacional.

Porém, a fabricação do eixo com ligas mais elaboradas poderá elevar consideravelmente seu custo, podendo ser necessário um novo estudo de viabilidade de implantação do mesmo, levando em consideração o custo-benefício que a inserção deste novo modelo otimizado traria para a produção.

Outro cenário simulado que mostrou uma boa possibilidade, foi a do uso de um aço mais comum, aço 1045. Este, mostrou-se resistente o suficiente para aplicação no equipamento e também, auxilia na redução de custos advindos da manutenção corretiva quando houver a necessidade da troca do eixo.

A aplicação da metodologia de simulação utilizando análise de elementos finitos possibilitou a visualização das regiões que apresentavam maiores concentrações de tensão, rapidamente realizar aprimoramentos no modelo, e chegar a resultados satisfatórios para o desenvolvimento do mesmo. Este aprimoramento no

eixo do tambor da máquina de carda proporcionará uma maior confiabilidade ao componente e conseqüentemente elevação na disponibilidade operacional ao ativo físico.

Diante os fatos apresentados, podemos evidenciar que através da aplicação da metodologia RCM, é possível associar a realização da FMEA para identificação de componentes primordiais para o melhor funcionamento do equipamento, e através da utilização de programas destinados a projetos mecânicos, realizar aperfeiçoamentos em tais componentes para melhorar sua manutenibilidade e por conseqüência garantir confiabilidade ao elemento mecânico.

6.2 RECOMENDAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como recomendação da continuação desse trabalho propõe-se:

- Estudar a viabilidade de implantação do modelo proposto, levando em consideração o custo-benefício proporcionado pelo uso de aços liga com melhores propriedades mecânicas.
- Realizar um estudo mais amplo a respeito do uso do aço 1045 para fabricação do eixo, contemplando acompanhamento do seu desgaste e também do comportamento no arranque no tambor.
- Realizar acompanhamento do novo modelo do eixo aplicado à máquina de carda e registrar dados de produção e manutenção após a implantação. Com isso será possível analisar os ganhos decorrentes do ganho de confiabilidade do componente proporcionada através da análise de elementos finitos.
- Realizar estudo dinâmico no eixo para possibilitar a visualização de falha por fadiga.

- Posteriormente, poderá fazer-se uso de técnicas preditivas para realizar monitoramento do equipamento, especificamente, da análise de vibração, para garantir mais ainda a confiabilidade do ativo físico.

REFERÊNCIAS

AL-GHAMD, Abdullah M.; MBA, David. A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size. **Mechanical systems and signal processing**, v. 20, n. 7, p. 1537-1571, 2006.

AZEVEDO, Álvaro FM. **Método dos elementos finitos**. 1ª ed. 2003.

BANDEIRA, Matheus Henrique Cavalcante; COSTA, Daiane de Oliveira; LOPES, Rodrigo Sampaio. **Estudo da Manutenção Centrada em Confiabilidade Aplicada à um Sistema de Refrigeração**. Anais do XXXVI ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção. João Pessoa/PB, Brasil, 03 à 06 de outubro de 2016.

BARAN, Leandro Roberto. **Manutenção centrada em confiabilidade aplicada na redução de falhas: um estudo de caso**. 2012.

CARAZAS, F. J. G.; SALAZAR, C. H.; SOUZA, Gilberto Francisco Martha de. Availability analysis of heat recovery steam generators used in thermal power plants. **Energy**, v. 36, n. 6, p. 3855-3870, 2011.

DHILLON, Balbir S. **Engineering maintainability**: how to design for reliability and easy maintenance. Gulf Professional Publishing, 1999.

DHILLON, Balbir S. **Maintainability, maintenance, and reliability for engineers**. 1ª ed. New York: CRC Press, 2006. 228 p.

FONSECA, Aline Fagundes da; SILVA, Ramon Nolasco da; PEREIRA, Kleber Rodrigo Alves; MARINHO, Marcos Marcondes do Amaral. et al. **Análise dos planos de manutenção para os equipamentos do sistema de medição de gás numa empresa de ramo petroquímica**. Anais do XXXVI ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção. João Pessoa/PB, Brasil, 03 à 06 de outubro de 2016.

GIACCHINI, Breno Loureiro. Uma breve introdução ao Método dos Elementos Finitos. **Departamento de Matemática: Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais**, 2012.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, v. 5, p. 61, 2002.

JARDINE, A. K. S.; BANJEVIC, D.; MAKIS, V. Optimal replacement policy and the structure of software for condition-based maintenance. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 3, n. 2, p. 109-119, 1997.

KAREEM, B.; JEWOW, A. O. Development of a model for failure prediction on critical equipment in the petrochemical industry. **Engineering Failure Analysis**, v. 56, p. 338-347, 2015.

KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. **Manutenção-função estratégica**. Qualitymark Editora Ltda, 2015.

KARDEC, Allan; LAFRAIA, Joao Ricardo Barusso. **Gestão estratégica e Confiabilidade**. Qualitymark Editora Ltda, 2002.

LEINART, Fabrício. **Simulação por elementos finitos na prática – parte 1**. Disponível em <<http://www.clubedoprojetista.com.br/simulacao-por-elementos-finitos-parte1/>>. Acesso em: 31 de maio de 2018.

LIRA, David N. **Modelagem do Prognóstico e Gestão da Saúde de Máquinas Mecânicas no contexto de Sistemas Ciberfísicos na Manufatura**. 2017. 171 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Materiais (PPGEM), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

MARCORIN, Wilson Roberto; LIMA, Carlos Roberto Camello. Análise dos Custos de Manutenção e de Não-manutenção de Equipamentos Produtivos. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 11, n. 22, p. 35-42, 2003.

MARZO, Giuseppe Renato Di. **Aplicação do método dos elementos finitos na análise de tensões induzidas em cabos umbilicais**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MOBLEY, R. Keith. **An introduction to predictive maintenance: 2^a edition**. [S.L.]: Butterworth-Heinemann, 2002. 437 p.

MOBLEY, R. K.; HIGGINS, L. R.; WIKOFF, D. J. **Maintenance engineering handbook**. 7^a ed. New York: McGraw-Hill, 2008. 1200 p.

MODGIL, Vikas; SHARMA, S. K.; SINGH, Jagtar. Performance modeling and availability analysis of shoe upper manufacturing unit. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 30, n. 8, p. 816-831, 2013.

MOUBRAY, John. **Reliability-centered maintenance**. 2^a ed. New York: Industrial Press Incorporation, 1997.

MOREIRA, T. B.; SILVA, D.P.; BEZERRA, P.H.R.; CARVALHO, W.J.S. **Proposta de aplicação da manutenção centrada na confiabilidade no desenvolvimento do plano estratégico da manutenção: um estudo de caso**. Anais do XXXVI ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção. João Pessoa/PB, Brasil, 03 à 06 de outubro de 2016.

MULLER, Alexandre; SUHNER, Marie-Christine; IUNG, Benoît. Maintenance alternative integration to prognosis process engineering. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 13, n. 2, p. 198-211, 2007.

NANNI, Bruno. **Implementação de CADD nos cursos de graduação em engenharia mecânica**. 2016.

NUNES, Enon Laércio et al. **Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC): análise da implantação em uma sistemática de manutenção preventiva consolidada.** 2001.

OTANI, Mario; MACHADO, Waltair Vieira. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 4, n. 2, p. 1-16, 2008

PARIDA, Aditya; KUMAR, Uday. Maintenance performance measurement (MPM): issues and challenges. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 12, n. 3, p. 239-251, 2006.

PEREIRA, G. S. **Materiais e Processos Têxteis.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2009.

PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico-2ª ed.** Editora Feevale, 2013.

SÁNCHEZ, César Antonio Aparicio. **Estudo de Impacto Usando Elementos Finitos e Análise Não Linear.** 2001. 129f. 2001. Tese de Doutorado. Dissertação.(Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade de São Paulo, São Carlos.

SANTOS, Fabiano Ramos dos; FERREIRA, Sergio da costa; PIAIA, Joelson. **Computer Aided Engineering – CAE.** Joinvile, 2004.

SIEMENS PLM Software. **Global provider of Product Lifecycle Management (PLM) and Manufacturing Operations Management (MOM) software.** Disponível em: <<http://www.plm.automation.siemens.com>>. Acesso em: 04 de abril de 2018

SILVA, Franco Jefferds dos Santos et al. Availability forecast of mining equipment. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 22, n. 4, p. 418-432, 2016.

SIMÕES, Jorge Alexandre Mendes. **Indicadores de performance em manutenção industrial: utilização, valor e disponibilidade de informação.** 2011. Dissertação de Mestrado. FEUC.

SMITH, Ricky; MOBLEY, R. Keith. **Rules of thumb for maintenance and reliability engineers.** 1º ed. Butterworth-Heinemann, 2007. 336 p.

TAVARES, H. **Aplicação de Metodologias RCM nos Planos de Manutenção de Sistemas de Proteção, Comando e Controle.** 2012. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

TEIXEIRA, J. Carlos; RODRIGUES, Nelson José Oliveira. **Dinâmica de fluidos computacional.** 2016.

TOLEDO, José Carlos de; AMARAL, Daniel Capaldo. FMEA: análise do tipo e efeito de falha. **Ed. GEPEQ–Grupo de Estudos e Pesquisa em Qualidade. UFSCar**, 2006.

TRÜTZSCHLER. **Tecnologia da fita.** Disponível em: <
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3270131/mod_folder/content/0/catalogo_car_da_passador.pdf?forcedownload=1>. Acesso em: 08 de maio de 2018.

VILES, E. et al. Improving the corrective maintenance of an electronic system for trains. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 13, n. 1, p. 75-87, 2007.

APÊNDICE A – FMEA da máquina de carda

(Início)

ANÁLISE DE SINTOMAS E MODOS DE FALHAS EM MÁQUINAS (FMSA)

Projeto:		Data: 08/05/2018	Versão:
-----------------	--	-------------------------	----------------

Empresa	Processo	Setor	Equipamento (Sistema)	Máquina
Têxtil	Cardagem	Abertura e preparação	Carda TC	Carda TC

ID (TAG)	Função principal requerida da máquina	Funcionamento		Tempo de funcionamento
	Cardagem de fibras de algodão	Intermitente <input type="radio"/>	Contínuo <input checked="" type="radio"/>	712 h/mês

Periodicidade de monitoramento	Técnica preditiva usada
Não se aplica	Não se aplica

Componente mecânico rotativo	Função Requerida	Modo de Falha	Causa Potencial da Falha	Sintoma apresentado	Efeito Potencial da Falha	SEV	DGN
Cilindro de alimentação	Proporcionar o tensionamento adequado ao material alimentado a Carda para assegurar um fluxo otimizado da matéria-prima através da largura completa do silo	Fadiga do eixo de acionamento	Práticas inadequadas de instalação de rolamentos e componentes	-	Não proporcionará o aperto necessário do material alimentado a carda, proporcionará ruptura do eixo de acionamento, excesso de vibração, temperatura, alto custo de manutenção	3	-
			Vida útil excedida	-			-
			Vibração e desbalanceamento	-			-
		Desgaste do conjunto de acionamento	Falta ou excesso de lubrificação ou má instalação	-	Ruptura do conjunto de acionamento, alto desgaste, ineficiência de rotação, ineficiência de torque, ineficiência no aperto da matéria-prima		-
		Travamento dos fusos	Particulados de alta granulação e/ou acúmulo de fibras de algodão	-	Desgaste excessivo, contaminação da matéria-prima, baixa eficiência no aperto da matéria-prima, temperatura excessiva de trabalho, alta pressão de trabalho, alto custo de manutenção		-
			Fratura dos fusos	-			-
Falta de lubrificação ou lubrificação demasiada	-		-				
Cilindro abridor	Proporcionar uma abertura regular do material	Fadiga do eixo de acionamento	Práticas inadequadas de instalação de rolamentos e componentes	-	Não irá proporcionar abertura necessária da matéria-prima, proporcionará ruptura do eixo de acionamento, excesso de vibração e temperatura de trabalho, alto custo de manutenção	3	-
			Vida útil excedida	-			-
			Vibração e desbalanceamento	-			-
		Desgaste do conjunto de acionamento	Falta ou excesso de lubrificação ou má instalação	-	Ruptura do conjunto de acionamento, alto desgaste, ineficiência de rotação, ineficiência de torque, ineficiência na abertura da matéria-prima		-
		Travamento dos fusos	Fratura dos fusos	-	Inoperação da unidade de alimentação, travamentos sucessivos, contaminação do lubrificante, temperatura excessiva de trabalho, alto custo de manutenção		-
			Falta de lubrificação ou lubrificação demasiada	-			-
Particulados de alta granulação e/ou acúmulo de fibras de algodão	-		-				

(Continua)

(Continuação)

Componente mecânico rotativo	Função Requerida	Modo de Falha	Causa Potencial da Falha	Sintoma apresentado	Efeito Potencial da Falha	SEV	DGN
Ventilador	Assegurar uma compressão regular do material no silo inferior	Fadiga no eixo da hélice	Práticas inadequadas de instalação de rolamentos e componentes	-	Ruptura do eixo, inoperação do sistema de ventilação, não irá proporcionar a compressão desejada do material no silo inferior, contaminação da matéria-prima com particulados, vibrações e temperatura de trabalho excessiva, alto custo de manutenção	2	-
			Vida útil excedida	-			-
			Vibração e/ou desbalanceamento	-			-
		Travamento do eixo da hélice	Falta ou excesso de lubrificação ou má instalação	-	Inoperação do sistema de ventilação, não irá proporcionar a compactação desejada do material no silo, contaminação do lubrificante, contaminação da matéria-prima		-
			Particulados de alta granulação e/ou acúmulo de fibras de algodão	-			-
Cilindro de abertura e limpeza	Promover a limpeza da matéria-prima	Fadiga do eixo de acionamento	Práticas inadequadas de instalação de rolamentos e componentes	-	Não proporcionará a limpeza necessária do material alimentado a carda, proporcionará ruptura do eixo de acionamento, acarretará em sobreposição dos cilindros, inoperação do sistema de cardagem, vibração e temperatura de trabalho excessivas, alto custo de manutenção	3	-
			Vida útil excedida	-			-
			Vibração e/ou desbalanceamento	-			-
		Desgaste do conjunto de acionamento	Falta ou excesso de lubrificação ou má instalação	-	Ruptura do conjunto de acionamento, alto desgaste, ineficiência de rotação, ineficiência de torque, ineficiência na limpeza da matéria-prima		-
			Particulados de alta granulação e/ou acúmulo de fibras de algodão	-			-
		Travamento dos fusos	Fratura dos fusos	-	Inoperação da unidade de pré-abertura, travamentos sucessivos, contaminação do lubrificante, temperatura excessiva de trabalho, alto custo de manutenção		-
			Falta de lubrificação ou lubrificação demasiada	-			-
	-		-				
Cilindro alimentador da tina	Responsável na passagem e compactação do velo de algodão para a tina de alimentação	Fadiga do eixo de acionamento	Práticas inadequadas de instalação de rolamentos e componentes	-	Não irá proporcionar compactação necessária da matéria-prima, proporcionará ruptura do eixo de acionamento, vibração e temperatura de trabalho excessivas, alto custo de manutenção	3	-
			Vida útil excedida	-			-
			Vibração e/ou desbalanceamento	-			-
		Desgaste do conjunto de acionamento	Falta ou excesso de lubrificação ou má instalação	-	Ruptura do conjunto de acionamento, alto desgaste, ineficiência de rotação, ineficiência de torque, ineficiência na compactação da matéria-prima		-
			Particulados de alta granulação e/ou acúmulo de fibras de algodão	-			-
		Travamento dos fusos	Fratura dos fusos	-	Inoperação da unidade de alimentação, travamentos sucessivos, contaminação do lubrificante, temperatura excessiva de trabalho, alto custo de manutenção		-
			Falta de lubrificação ou lubrificação demasiada	-			-
	-		-				

(Continua)

(Continuação)

Componente mecânico rotativo	Função Requerida	Modo de Falha	Causa Potencial da Falha	Sintoma apresentado	Efeito Potencial da Falha	SEV	DGN			
Dispositivo de limpeza dos flats de 2 cilindros	Promover a limpeza e remoção de fibras da matéria-prima do sistema de flats	Fadiga do eixo de acionamento	Práticas inadequadas de instalação de rolamentos e componentes	Vibração	Não proporcionará a limpeza do sistema de flats, proporcionará ruptura do eixo de acionamento, vibração e temperatura de trabalho excessivas, alto custo de manutenção	4	3			
			Vida útil excedida	Vibração			3			
			Vibração e/ou desbalanceamento	Vibração			3			
		Desgaste do conjunto de acionamento	Falta ou excesso de lubrificação ou má instalação	Vibração	Ruptura do conjunto de acionamento, alto desgaste, ineficiência de rotação, temperatura excessiva de trabalho ineficiência de torque, ineficiência na limpeza do sistema de flats		3			
		Travamento dos fusos	Particulados de alta granulação e/ou acúmulo de fibras de algodão	Ruído	Inoperação da unidade de limpeza dos flats, contaminação do lubrificante, temperatura excessiva de trabalho, alto custo de manutenção		4			
			Fratura dos fusos	Vibração			3			
			Falta de lubrificação ou lubrificação demasiada	Temperatura			4			
		Tambor	Aceitar o material alimentado pela unidade de pré-abertura e conduzir à área dos flats	Fadiga do eixo de acionamento	Práticas inadequadas de instalação de rolamentos e componentes		Vibração	Não irá proporcionar o encaminhamento da matéria-prima para o sistema de flats, proporcionará ruptura do eixo de acionamento, vibração e temperatura de trabalho excessivas, alto custo de manutenção	4	2
					Vida útil excedida		Vibração			2
Vibração e/ou desbalanceamento	Vibração				2					
Desgaste do conjunto de acionamento	Falta ou excesso de lubrificação ou má instalação			Vibração	Ruptura do conjunto de acionamento, alto desgaste, ineficiência de rotação, ineficiência de torque	3				
Travamento dos fusos	Particulados de alta granulação e/ou acúmulo de fibras de algodão			Ruído	Inoperação da unidade de cardagem, travamentos sucessivos, contaminação do lubrificante, temperatura excessiva de trabalho, alto custo de manutenção	4				
	Fratura dos fusos			Vibração		3				
	Falta de lubrificação ou lubrificação demasiada			Temperatura		4				
Cilindro do doffer	Receber as fibras do tambor e formar o velo de fibras			Fadiga do eixo de acionamento	Práticas inadequadas de instalação de rolamentos e componentes	Vibração	Não proporcionará o recebimento do material cardado, proporcionará ruptura do eixo de acionamento, inoperação da unidade de recebimento das fibras, vibração e temperatura de trabalho excessivas, alto custo de manutenção	4		3
					Vida útil excedida	Vibração				3
		Vibração e/ou desbalanceamento	Vibração		3					
		Desgaste do conjunto de acionamento	Falta ou excesso de lubrificação ou má instalação	Vibração	Ruptura do conjunto de acionamento, alto desgaste, ineficiência de rotação, ineficiência de torque, ineficiência no recebimento das fibras cardadas	3				
		Travamento dos fusos	Particulados de alta granulação e/ou acúmulo de fibras de algodão	Ruído	Inoperação da unidade da área do doffer, travamentos sucessivos, contaminação do lubrificante, temperatura excessiva de trabalho, alto custo de manutenção	4				
			Fratura dos fusos	Vibração		3				
			Falta de lubrificação ou lubrificação demasiada	Temperatura		4				

(Continua)

(Continuação)

Componente mecânico rotativo	Função Requerida	Modo de Falha	Causa Potencial da Falha	Sintoma apresentado	Efeito Potencial da Falha	SEV	DGN
Cilindro separador	Receber o velo do cilindro do doffer e transportá-lo aos dois cilindros esmagadores	Fadiga do eixo de acionamento	Práticas inadequadas de instalação de rolamentos e componentes	-	Não irá proporcionar o encaminhamento das fibras cardadas aos cilindros esmagadores, proporcionará ruptura do eixo de acionamento, vibração e temperatura de trabalho excessivas, alto custo de manutenção	3	-
			Vida útil excedida	-			
			Vibração e/ou desbalanceamento	-			
		Desgaste do conjunto de acionamento	Falta ou excesso de lubrificação ou má instalação	-	Ruptura do conjunto de acionamento, alto desgaste, ineficiência de rotação, ineficiência de torque, ineficiência no encaminhamento das fibras cardadas aos cilindros esmagadores		
		Travamento dos fusos	Particulados de alta granulação e/ou acúmulo de fibras de algodão	-	Inoperação da unidade da área do doffer, travamentos sucessivos, contaminação do lubrificante, temperatura excessiva de trabalho, alto custo de manutenção		
			Fratura dos fusos	-			
Falta de lubrificação ou lubrificação demasiada	-						
Cilindro de limpeza	Responsável em proporcionar a limpeza do cilindro separador	Fadiga do eixo de acionamento	Práticas inadequadas de instalação de rolamentos e componentes	-	Não irá proporcionar a limpeza necessária do cilindro separador, proporcionará ruptura do eixo de acionamento, vibração e temperatura de trabalho excessivas, alto custo de manutenção	3	-
			Vida útil excedida	-			
			Vibração e/ou desbalanceamento	-			
		Desgaste do conjunto de acionamento	Falta ou excesso de lubrificação ou má instalação	-	Ruptura do conjunto de acionamento, alto desgaste, ineficiência de rotação, ineficiência de torque, ineficiência na limpeza do cilindro separador		
		Travamento dos fusos	Particulados de alta granulação e/ou acúmulo de fibras de algodão	-	Inoperação da área do doffer, travamentos sucessivos, contaminação do lubrificante, temperatura excessiva de trabalho, alto custo de manutenção		
			Fratura dos fusos	-			
Falta de lubrificação ou lubrificação demasiada	-						
Cilindros esmagadores	Possuindo dois cilindros tangentes, possui a função de promover o esmagamento do velo de algodão	Fadiga do eixo de acionamento	Práticas inadequadas de instalação de rolamentos e componentes	-	Não irá proporcionar o esmagamento necessário do velo de algodão, proporcionará ruptura do eixo de acionamento, vibração e temperatura de trabalho excessivas, alto custo de manutenção	3	-
			Vida útil excedida	-			
			Vibração e/ou desbalanceamento	-			
		Desgaste do conjunto de acionamento	Falta ou excesso de lubrificação ou má instalação	-	Ruptura do conjunto de acionamento, alto desgaste, ineficiência de rotação, ineficiência de torque, ineficiência no esmagamento do velo de algodão		
		Travamento dos fusos	Particulados de alta granulação e/ou acúmulo de fibras de algodão	-	Inoperação da área do doffer, travamentos sucessivos, contaminação do lubrificante, temperatura excessiva de trabalho, alto custo de manutenção		
			Fratura dos fusos	-			
Falta de lubrificação ou lubrificação demasiada	-						

(Continua)

(Conclusão)

Componente mecânico rotativo	Função Requerida	Modo de Falha	Causa Potencial da Falha	Sintoma apresentado	Efeito Potencial da Falha	SEV	DGN
Cilindros de descarga	Retirar as fitas cardadas e encaminhar para a sentinela, onde serão armazenadas	Fadiga do eixo de acionamento	Práticas inadequadas de instalação de rolamentos e componentes	-	Não irá proporcionar a formação da fita de cardada, proporcionará ruptura do eixo de acionamento, vibração e temperatura de trabalho excessivas, alto custo de manutenção	3	-
			Vida útil excedida	-			-
			Vibração e/ou desbalanceamento	-			-
		Desgaste do conjunto de acionamento	Falta ou excesso de lubrificação ou má instalação	-	Ruptura do conjunto de acionamento, alto desgaste, ineficiência de rotação, ineficiência de torque, ineficiência na formação da fita cardada		-
		Travamento dos fusos	Particulados de alta granulação e/ou acúmulo de fibras de algodão	-	Inoperação da área do doffer, travamentos sucessivos, contaminação do lubrificante, temperatura excessiva de trabalho, alto custo de manutenção		-
			Fratura dos fusos	-			-
			Falta de lubrificação ou lubrificação demasiada	-			-