

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ESPECIALIZAÇÃO EM GERÊNCIA DE MANUTENÇÃO**

**CASSIO GUIMARÃES DOS SANTOS**

**DETERMINAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE VIDA ÚTIL EM EIXOS  
ROTATIVOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE  
DE ELEMENTOS FINITOS: UMA ABORDAGEM VOLTADA À  
MANUTENÇÃO PREDITIVA E ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2018**

**CASSIO GUIMARÃES DOS SANTOS**

**DETERMINAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE VIDA ÚTIL EM EIXOS  
ROTATIVOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE  
DE ELEMENTOS FINITOS: UMA ABORDAGEM VOLTADA À  
MANUTENÇÃO PREDITIVA E ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rigoni

**CURITIBA**

**2018**



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **DETERMINAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE VIDA ÚTIL EM EIXOS ROTATIVOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS: UMA ABORDAGEM VOLTADA À MANUTENÇÃO PREDITIVA E ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO**

por

**CASSIO GUIMARÃES DOS SANTOS**

Esta monografia foi apresentada em 27 de agosto de 2018, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Gerência de Manutenção, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Emerson Rigoni, Dr.Eng.  
Professor Orientador - UTFPR

---

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

---

Prof. Carlos Henrique K. Salata, Esp.  
Membro Titular da Banca - UTFPR

Dedico este trabalho à minha mãe “in memoriam”, e minha irmã “in memoriam”, pois sem elas este trabalho e muitos dos meus sonhos não se realizariam.

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Emerson Rigoni, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

Aos meus professores da graduação que me auxiliaram nas pesquisas.

Aos meus colegas de empresa envolvidos com o projeto que ofereceram ajuda inestimável ao trabalho.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

SANTOS, Cassio Guimarães. **DETERMINAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE VIDA ÚTIL EM EIXOS ROTATIVOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS: UMA ABORDAGEM VOLTADA À MANUTENÇÃO PREDITIVA E ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO**. 86 páginas. Monografia (Especialização em Gerência de Manutenção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

A manutenção preditiva bem como suas ferramentas de análises vem evoluindo com o passar dos anos, se torna cada vez mais importante para uma empresa possuir técnicas de análises preditivas eficazes, logo é grande a procura no mercado industrial por técnicas que sejam mais baratas e eficientes. Este trabalho propõe o uso de uma tecnologia bastante difundida na área de projetos mecânicos, porém que ainda é pouco utilizada na manutenção trata se das análises de elementos finitos, essa ferramenta é utilizada no dimensionamento de peças, conjuntos e máquinas com o intuito de reduzir gastos com projeto, fabricação, testes e retrabalhos, as análises de elementos finitos tem ainda a capacidade de estimar a vida útil de um elemento mecânico, e é principalmente nessa aplicação que ela se mostra importante para a manutenção preditiva, pois é possível prever a quebra de um equipamento, preparar a parada, comprar peças de reposição e evitar quebras. A metodologia permite também a evolução do projeto analisado, o aumento da vida útil do componente e conseqüentemente um ganho em confiabilidade.

No presente trabalho são analisados elementos mecânicos de uma linha de pintura de uma empresa siderúrgica da grande Curitiba, e os resultados obtidos serão aplicados diretamente no processo. Desde as análises de vida útil dos elementos, passando pelas mudanças no projeto que visam melhorias em confiabilidade e disponibilidade e chegando até a fabricação desses novos elementos em oficina de fabricação e usinagem da própria siderúrgica.

Alguns resultados esperados por esse trabalho demandam de um determinado prazo para serem observados, como a eficiências das análises de vida útil através dos elementos finitos, por outro lado outros resultados puderam ser observados imediatamente. Entre esses resultados estão o aumento da confiabilidade do projeto, através da aplicação de práticas comuns de elementos de máquinas e os ganhos em tempo de fabricação como os novos projetos.

**Palavras-chave:** Elementos Finitos. Manutenção Preditiva. Usinagem.

## ABSTRACT

SANTOS, Cassio Guimarães. **DETERMINATION AND OPTIMIZATION OF USEFUL LIFE IN ROTARY AXES THROUGH THE APPLICATION OF FINITE ELEMENT ANALYSIS TECHNIQUES: AN APPROACH TO BACK TO PREDICTIVE MAINTENANCE AND MAINTENANCE ENGINEERING.** 86 pages. Monografia (Especialização em Gerência de Manutenção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Predictive maintenance as well as its analytical tools has been evolving over the years, it becomes increasingly important for a company that works with some level of maintenance to have effective predictive analytical techniques, so the demand in the industrial market for techniques is great that are cheaper and more efficient. This work proposes the use of a very widespread technology in the area of mechanical design, but is still little used in maintenance, dealing with finite element analysis, this tool is used in the dimensioning of parts, assemblies and machines with the aim of reducing In addition, the analysis of finite elements has the ability to estimate the useful life of a mechanical element, and it is mainly in this application that it is important for predictive maintenance, since it is possible to predict the break equipment, prepare the stop, buy spare parts and avoid breakages. The methodology also allows the evolution of the analyzed project, the increase in the useful life of the component and consequently a gain in reliability.

In the present work are analyzed mechanical elements of a painting line of a steel company of the great Curitiba, and the obtained results will be applied directly in the process, from the analysis of the useful life of the elements, through the changes in the project that aim at improvements in reliability and availability and reaching the manufacturing of these new elements in the steelmaking and machining workshop.

Some results expected by this work demand a certain time period to be observed, as well as the efficiency of the analysis of useful life through the finite elements, on the other hand other results could be observed immediately. Among these results are the increased reliability of the project, through the application of common practices of machine elements and the gains in manufacturing time as new projects.

**Palavras-chave:** Finite elements. Predictive Maintenance. Machining.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho Técnico Original Rolo Aplicador.....	16
Figura 2 - Rolos revestidos aguardando instalação .....	16
Figura 3 - Falha na ponteira tracionadora .....	17
Figura 4 - Falha do rolo no tubo principal.....	17
Figura 5 - Viga biapoiada, geometria relativamente simples e de plausível resolução pelos métodos clássicos .....	21
Figura 6 - Viga biapoiada resolvida através do método de elementos finitos.....	22
Figura 7 - Malha de elementos finitos gerada para o virabrequim de um motor .....	22
Figura 8 - Peça a ser gerada a malha / elemento triangular básico de uma malha de elementos finitos .....	23
Figura 9 - Modelo de malha de elementos finitos simples \ modelo de malha de elementos finitos refinado .....	23
Figura 10 - Evolução histórica do MEF .....	25
Figura 11 - Tipos de elementos e aplicações.....	28
Figura 12 - Diferentes densidades de malhas para o mesmo elemento .....	29
Figura 13 - Diferentes condições de contorno para uma mesma carga aplicada.....	30
Figura 14 - Tipos de manutenção.....	33
Figura 15 - Evolução da manutenção X Custos/Resultados .....	33
Figura 16 - Aplicação dos recursos por tipo de manutenção .....	36
Figura 17 - Acompanhamento subjetivo de ruído.....	37
Figura 18 - Espectro de vibração .....	39
Figura 19 - Espectro de vibração 2 .....	40
Figura 20 - Medição feita através de probe.....	40
Figura 21 - Tipos de acelerômetros 1 .....	41
Figura 22 - Tipos de acelerômetros 2.....	41
Figura 23 - Vibrômetros.....	42
Figura 24 - Canetas de vibração .....	42
Figura 25 - Analisador de medição.....	43
Figura 26 - Termometro por expansão de líquido .....	43
Figura 27 - Termometro bi-metálico .....	44
Figura 28 - Termopares industriais.....	44
Figura 29 - Termômetros infravermelho .....	45
Figura 30 - Cameras termográficas.....	45
Figura 31 - Termograma de um motor elétrico .....	46
Figura 32 - Exemplos de ferrogramas.....	46
Figura 33 - Equipamento ultrassonico.....	47
Figura 34 - Vaso de pressão rompido .....	48
Figura 35 - Medidores de espessura.....	49



Figura 36 - Rolo utilizado para as análises .....	51
Figura 37 - Corte do rolo para análise.....	52
Figura 38 - Durezas medidas no rolo .....	52
Figura 39 - Desenho técnico detalhado do rolo aplicador .....	55
Figura 40 - Superfícies de aplicação de força criadas .....	56
Figura 41 - Arvore de opções de análises.....	57
Figura 42 - Barra de ferramentas da análise estática.....	57
Figura 43 - Aplicação do material.....	58
Figura 44 - Opções de fixação .....	58
Figura 45 - Aplicação de acessório de fixação .....	59
Figura 46 - Opções para aplicação de cargas.....	59
Figura 47 - Parâmetros de aplicação de carga.....	60
Figura 48 - Configurações de malha .....	60
Figura 49 - Malha de elementos finitos gerada para a ponteira .....	61
Figura 50 - Resultado de tensões ponteira.....	61
Figura 51 - Resultados de deslocamento ponteira .....	62
Figura 52 - Resultados do fator de segurança ponteira .....	62
Figura 53 - Barra de ferramentas da análise de fadiga .....	63
Figura 54 - Configurações do evento de fadiga.....	63
Figura 55 - Resultados para vida em fadiga da ponteira .....	64
Figura 56 - Resultado de tensões tubo .....	65
Figura 57 - Resultados de deslocamento do tubo .....	66
Figura 58 - Resultados do fator de segurança do tubo .....	66
Figura 59 - Resultados para vida em fadiga da ponteira .....	67
Figura 60 - Desenho técnico com alterações baseadas em concentradores de tensão .....	68
Figura 61 - Resultado de tensões ponteira melhorias A.....	69
Figura 62 - Resultados de deslocamento ponteira melhorias A .....	70
Figura 63 - Resultados do fator de segurança ponteira melhorias A.....	70
Figura 64 - Resultados para vida em fadiga da ponteira melhoria A.....	71
Figura 65 - Desenho técnico do rolo maciço .....	72
Figura 66 - Resultado de tensões rolo maciço .....	73
Figura 67 - Resultados de deslocamento ponteira melhorias A .....	73
Figura 68 - Resultados do fator de segurança rolo Maciço .....	74
Figura 69 - Resultados para vida em fadiga rolo maciça .....	74
Figura 70 - Usinagem da ponteira .....	80
Figura 71 - Usinagem do tubo principal.....	81
Figura 72 - Tubo sofrendo dilatação para montagem.....	81
Figura 73 - Rolo montado aguardando solda .....	82
Figura 74 - Rolo em operação de usinagem .....	82
Figura 75 - Rolos concluídos.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Histórico de falhas rolo aplicador últimos 18 meses.....	18
Tabela 2 - Custos associados as falhas dos rolos ultimos 18 meses.....	18
Tabela 3 - Evolução da manutenção .....	35
Tabela 4 - Valores de dureza encontrados no rolo através do durômetro.....	53
Tabela 5 - Conversão entre unidades de medida de dureza.....	53
Tabela 6 - Propriedades mecânicas de alguns aços carbono .....	54
Tabela 7 - Comparação entre os modelos de rolos aplicadores (integridade mecânica).....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 8 - Comparação entre os modelos de rolos aplicadores (Custos) .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS**

### **LISTA DE SIGLAS**

CC Condições de Contornos

### **LISTA DE ACRÔNIMOS**

Abraman Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos  
CAD Computer Aided Design  
CAE Computer Aided Engineering  
MEF Métodos de Elementos Finitos

## LISTA DE SÍMBOLOS

A – Amplitude do vetor de zero a pico

$\omega$  – Velocidade angular

t – Tempo

$\pi$  – razão de um círculo em relação a sua circunferência e diâmetro

f – Frequência

$S_{ult}$  – Tensão de resistência a tração

Hb – Dureza Brinell

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	TEMA DE PESQUISA .....	14
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA .....	14
1.3	DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	14
1.4	OBJETIVOS .....	15
1.4.1	Objetivo Geral.....	15
1.4.2	Objetivos Específicos .....	15
1.5	JUSTIFICATIVA .....	16
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	19
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	20
<b>2</b>	<b>ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS .....</b>	<b>21</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	21
2.2	ASPECTOS GERAIS .....	21
2.3	EVOLUÇÃO HISTÓRICA .....	24
2.4	APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS.....	26
2.5	ANÁLISE ESTRUTURAL DE TENSÕES .....	27
2.5.1	Geometria Dos Elementos .....	27
2.5.2	Geração de malha .....	29
2.5.3	Aplicação De Carga.....	30
2.5.4	Condições De Contorno .....	30
2.6	SINTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	31
<b>3</b>	<b>MANUTENÇÃO PREDITIVA E ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO ....</b>	<b>32</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	32
3.2	ASPECTOS GERAIS DE MANUTENÇÃO .....	32
3.3	EVOLUÇÃO HISTÓRICA .....	34
3.4	MANUTENÇÃO PREDITIVA .....	36
3.4.1	Principais Técnicas Preditivas .....	37
3.4.1.1	Análise De Vibração .....	38
3.4.1.2	Análise De Temperatura.....	43
3.4.1.3	Análise Do Lubrificante.....	46
3.4.1.4	Óleos Isolantes.....	47
3.4.1.5	Análises De Sons/Ruídos.....	47
3.4.1.6	Espessura De Parede .....	48
3.5	ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO .....	49
3.6	SINTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	50
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>51</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	51
4.2	ANÁLISE DO EQUIPAMENTO ATUAL .....	51
4.2.1	Análise De Elementos Finitos Rolo Aplicador Atual .....	56
4.2.1.1	Análise De Elementos Finitos Ponteira .....	56

4.2.1.2	Análises De Elementos Finitos Tubo.....	65
4.3	PROPOSTA DE MELHORIA A.....	67
4.3.1	Análise De Elementos Finitos Ponteira Melhoria A .....	69
4.4	PROPOSTA DE MELHORIA B.....	71
4.4.1	Análise De Elementos Finitos Melhoria B.....	73
4.5	ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS GERADOS .....	75
4.6	SINTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	78
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>80</b>
5.1	FABRICAÇÃO DO MODELO .....	80
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
5.2.1	Validação De Resultados Através De Ensaio Práticos .....	83
5.2.2	Estudo De Viabilidade De instalação Do Rolo Modificado B .....	84
5.2.3	Aplicação Dos Métodos De Elementos Finitos Para Diversos Tipos De Componentes Voltados A Manutenção Preditiva E Engenharia De Manutenção. ..	84
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 TEMA DE PESQUISA

A pesquisa realizada nesse trabalho tem como principal tema a manutenção preditiva e a engenharia de manutenção, esse tema normalmente é abordado levando em consideração as ferramentas amplamente utilizadas nesse tipo de manutenção. Algumas ferramentas apresentadas por Kardec e Nascif (2009) são a análise de vibrações e a termografia. Contudo, a presente pesquisa aborda a manutenção preditiva com a utilização de ferramenta amplamente utilizadas em projetos, a análise de elementos finitos, todavia não é de interesse nesse trabalho se aprofundar nas inúmeras técnicas disponíveis de análises de elementos finitos, bem como suas ferramentas e diferentes aplicações e sim utiliza-las com o intuito de ganhos na manutenção preditiva e auxílio a engenharia de manutenção de uma empresa.

### 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

As técnicas de manutenção preditiva são amplamente utilizadas na indústria dentro da engenharia de manutenção, algumas das técnicas possuem sua eficiência comprovada a anos, todavia novas técnicas surgem como opção, uma delas é a análise de elementos finitos, devido a pequena quantidade de pesquisas abordando esses dois temas em conjunto se faz necessária uma pesquisa sobre a eficiências da aplicação da ferramenta em engenharia de manutenção.

Dessa forma o problema de pesquisa a ser resolvido é: as análises de elementos finitos podem servir como ferramenta auxiliar na manutenção preditiva e engenharia de manutenção?

### 1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Tanto a área de análises de elementos finitos como a engenharia de manutenção são bastante amplas. O presente trabalho é delimitado nas análises estruturais dentro dos elementos finitos, na manutenção preditiva dentro da

engenharia de manutenção, e ainda em um elemento específico de máquina, trata-se de um eixo rotativo. Quaisquer outros elementos a serem analisados devem ser feitos com os devidos cuidados, respeitando as condições de cada modelo.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo Geral

Propor uma nova abordagem para a manutenção preditiva e engenharia de manutenção, determinando e otimizando a vida útil em eixos rotativos por meio de utilização de ferramentas de elementos finitos.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Fazem parte dos objetivos específicos deste trabalho e são fundamentais para o cumprimento do objetivo geral os seguintes itens:

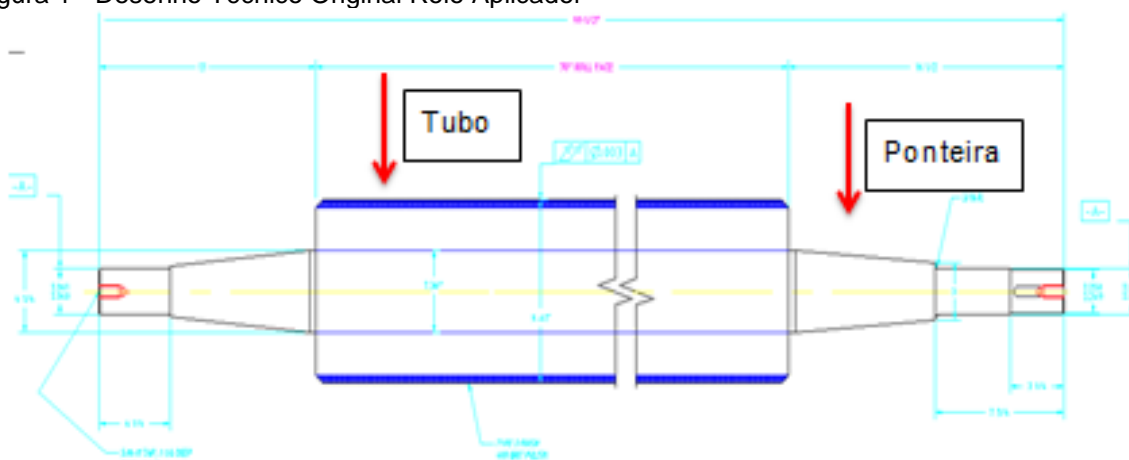
- Identificar os fatores necessários para que uma ferramenta seja utilizada na manutenção preditiva, e relacionar esses requisitos com a ferramenta de análise de elementos finitos;
- Aplicar a ferramenta de análise de elementos finitos em um equipamento real demonstrando a possibilidade da aplicação do método;
- Determinar a vida útil do equipamento analisado e conseqüentemente estabelecer estratégias de manutenção baseados nos dados gerados nas análises;
- Promover melhorias de projeto baseadas nos dados analisados e que gerem ganhos relacionados a engenharia de manutenção;
- Acompanhar a fabricação dos componentes otimizados e evidenciar as vantagens obtidas por fabricar os elementos dentro da própria empresa;
- Evidenciar as mudanças e ganhos na aplicação da ferramenta em relação aos processos anteriormente utilizados.



## 1.5 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho é justificado pelo elevado número de falhas semelhantes em um determinado componente da linha de pintura de uma siderúrgica da região metropolitana de Curitiba, o componente em questão é um rolo composto por três componentes principais, suas duas ponteiros e o tubo, esses podem ser vistos em detalhe na figura 1 com o desenho original do equipamento no início das análises, e na foto de um conjunto recém-chegado do fornecedor na figura 2.

Figura 1 - Desenho Técnico Original Rolo Aplicador



Fonte: CSN Araucária (2018)

As falhas nesse componente são altamente onerosas à companhia, pois envolvem custos de manutenção corretiva, compras em critério de emergência de componentes, atrasos nas entregas ao cliente, etc.

Figura 2 - Rolos revestidos aguardando instalação



Fonte: CSN Araucária (2018)

Essas falhas normalmente acontecem na ponteira onde acontece a tração via redutora, mostrada na figura 3, e no tubo principal.

Figura 3 - Falha na ponteira tracionadora



Fonte: CSN Araucária (2018)

A falha no tubo principal ocorre normalmente devido a diminuição da espessura de parede, essa diminuição acontece através da usinagem, cada vez que o revestimento precisa ser substituído uma operação de usinagem é feita no tubo, essa diminuição leva a perda de resistência mecânica e conseqüentemente perda de confiabilidade, uma falha no tubo é mostrada na figura 4.

Figura 4 - Falha do rolo no tubo principal



Fonte: CSN Araucária (2018)

O alto número de reincidência nesse tipo de falha aliado aos altos custos envolvidos gera preocupação as equipes de manutenção envolvidas, um histórico com as falhas ocorridas nos últimos 18 meses é apresentado na tabela 1.

Tabela 1 - Histórico de falhas rolo aplicador últimos 18 meses

PARADA	DATA	TEMPO DE PARADA (MINUTOS)	DESCRIÇÃO DA PARADA
1	27/3/17 17:53:00	37	Quebra da ponteira LM do rolo Aplicador do Finish. Paramos para troca do rolo e limpeza da tinta derramada da bandeja devido a quebra.
2	27/3/17 18:30:00	19	Quebra da ponteira LM do rolo Aplicador do Finish. Paramos para troca do rolo e limpeza da tinta derramada da bandeja devido a quebra.
3	18/6/17 02:21:00	48	Quebra na ponteira do rolo aplicador de primer superior e limpeza de tinta no piso inferior do cabeçote primer.
4	19/2/18 22:48:00	35	Quebrou a ponteira do rolo aplicador do Finish A. Trocado o rolo e feita limpeza na bandeja.
5	4/7/18 21:14:00	14	Rolo aplicador partiu em vários pontos.
6	16/7/18 07:17:00	42	Troca de rolo aplicador primer inferior danificado.
<b>TOTAL</b>		<b>195</b>	

Fonte: CSN Araucária/ O autor (2018)

Os custos associados às paradas apresentadas na tabela 1 são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Custos associados as falhas dos rolos ultimos 18 meses

CUSTO DA LINHA PARADA/HORA	R\$ 3.000,00	
TEMPO DE LINHA PARADA (MINUTOS)	195	
CUSTO DA LINHA PARADA PERIODO		R\$ 9.750,00
CUSTO PARA REPARO DO ROLO	R\$ 19.945,28	
CUSTO PARA REPOSIÇÃO DO PU	R\$ 3.729,23	
NÚMERO DE ROLOS DANIFICADOS NO PERIODO	6	
CUSTO DE REPOSIÇÃO DOS ROLOS NO PERIODO		R\$ 142.047,06
<b>CUSTO TOTAL DA PARADA GERADA PELA FALHA NO PERIODO</b>		<b>R\$ 151.797,06</b>

Fonte: CSN Araucária/ O autor (2018)

Os significativos custos com a substituição desses rolos associados a recorrência desse tipo de falha faz com que a equipe de manutenção volte seus esforços para algum tipo de melhoria no processo, dessa maneira as análises de elementos finitos juntamente com os conhecimentos de manutenção preditiva e engenharia de manutenção de apresentam como ferramentas plausíveis na solução do problema.

## 1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho desenvolvido, quanto a natureza, é classificado como pesquisa aplicada, pois busca a solução de um problema prático imediato. O trabalho seguiu uma abordagem qualitativa, apoiando-se principalmente em conceitos apresentados em literaturas específicas. Quanto aos objetivos, a pesquisa desenvolvida pode ser classificada como descritiva. Quanto aos procedimentos, a pesquisa caracteriza-se como bibliográfica e pesquisa-ação. Bibliográfica porque a estrutura proposta baseia-se em conceitos apresentados na literatura e pesquisa-ação porque o desenvolvimento foi realizado em associação com a resolução de um problema coletivo. Os procedimentos metodológicos adotados nessa pesquisa seguem os seguintes passos:

- Levantamento das paradas causadas pelas falhas do rolo aplicador, bem como seus impactos e consequências;
- Levantamento das bibliografias relacionadas e aperfeiçoamento das técnicas de análises de elementos finitos;
- Levantamento das bibliografias e conceitos relacionados as técnicas de manutenção preditiva e engenharia de manutenção;
- Levantamento de dados físicos do problema em questão (carga aplicada na linha, material de fabricação do componente, material processado na linha, potencia do motor, fatores de redução, etc.)
- Modelagem do equipamento em software CAD;
- Inserção dos dados encontrados em software CAE e aplicação no modelo gerado;
- Análise dos dados de falha e vida em fadiga após geração de análise de elementos finitos;
- Análise de possíveis melhorias baseada nos dados gerados pela análise utilizando conceitos de engenharia de manutenção;
- Aplicação das melhorias em campo;
- Análise sobre as melhorias aplicadas.

Os procedimentos metodológicos aqui desenvolvidos seguem o padrão de alguns estudos realizados referentes a análises de falhas e resolução de problemas.

## 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Os capítulos iniciais do trabalho apresentam os conceitos básicos para realização da pesquisa, bem como os capítulos finais fazem a associação dos temas abordados nos primeiros capítulos e aplicam os mesmos no problema de pesquisa. Sendo assim, excluindo-se o presente capítulo, os demais, possuem o seguinte conteúdo:

- O capítulo 2 mostra os conceitos básicos associados às análises de elementos finitos, sua evolução histórica, suas aplicações e serve como base para a aplicação da técnica no problema abordado na pesquisa;
- O capítulo 3 apresenta os conceitos e definições relacionados à manutenção preditiva e engenharia de manutenção, mostra o histórico desses tipos de manutenção e apresenta a possibilidade de aplicação das ferramentas no objeto de estudo;
- O capítulo 4 compila os primeiros capítulos na aplicação do problema em questão, neles são apresentadas as análises geradas por técnicas de elementos finitos com abordagem em manutenção preditiva e aplicadas as tomadas decisões baseadas nos conceitos de manutenção de engenharia.
- O capítulo 5 apresenta as conclusões e considerações finais do trabalho, nele é apresentada a síntese dos resultados, as dificuldades encontradas, as soluções para as dificuldades encontradas, os benefícios gerados para o processo e as sugestões para trabalhos futuros.

O trabalho é estruturado de maneira a apresentar ao leitor inicialmente os conceitos básicos envolvidos e posteriormente demonstrar a resolução do problema proposto.

## 2 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

### 2.1 INTRODUÇÃO

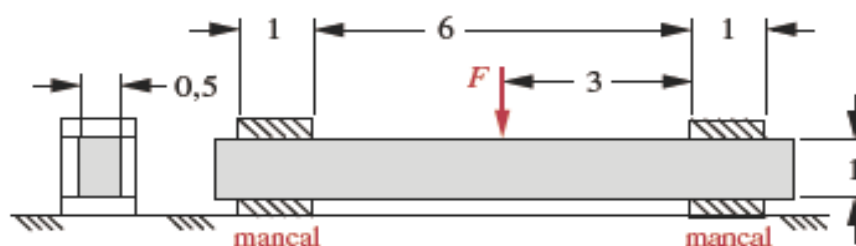
Este capítulo apresenta os conceitos básicos da análise de elementos finitos, suas aplicações básicas e usuais, bem como algum histórico da criação e utilização da ferramenta, tal fundamentação teórica é imprescindível para mostrar a possibilidade da utilização do recurso como ferramenta de manutenção preditiva e engenharia de manutenção.

### 2.2 ASPECTOS GERAIS

A análise de elementos finitos ou Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método de aproximação numérica para resolução de equações relativamente complexas para serem resolvidas a mão livre, segundo Fish e Belytschko (2007) o MEF é utilizado na engenharia para resolver problemas de análises de tensões, transferência de calor, escoamento de fluídos e eletromagnetismo, todos esses através de softwares por simulações de computador.

O campo de aplicação do MEF é bastante vasto, e quanto mais complexas as geometrias, mais importante e eficiente a ferramenta se mostra, a figura 5 apresenta uma geometria bastante simples, a análise de tensões do elementos poderia ser feita por cálculos manuais em uma prancheta, o cálculo demandaria uma certa experiência do projetista para identificar os pontos críticos, e esse poderiam passar despercebidos e até causar uma falha catastrófica.

Figura 5 - Viga biapoada, geometria relativamente simples e de plausível resolução pelos métodos clássicos

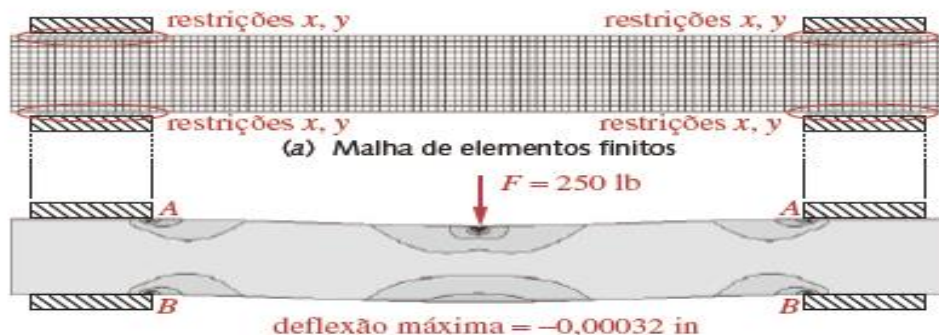


Fonte: Robert L. Norton (2013)

As simulações diminuem os custos de projeto, pois são menores os investimentos em protótipos e qualquer falha que o projetista possa não ter

percebido fica evidente ainda nas primeiras fases do projeto, problemas com processos de fabricação também podem ser percebidos nas fases iniciais, evitando possíveis retrabalhos. A figura 6 mostra o mesmo problema da figura 5, dessa vez sendo resolvida por meio dos elementos finitos.

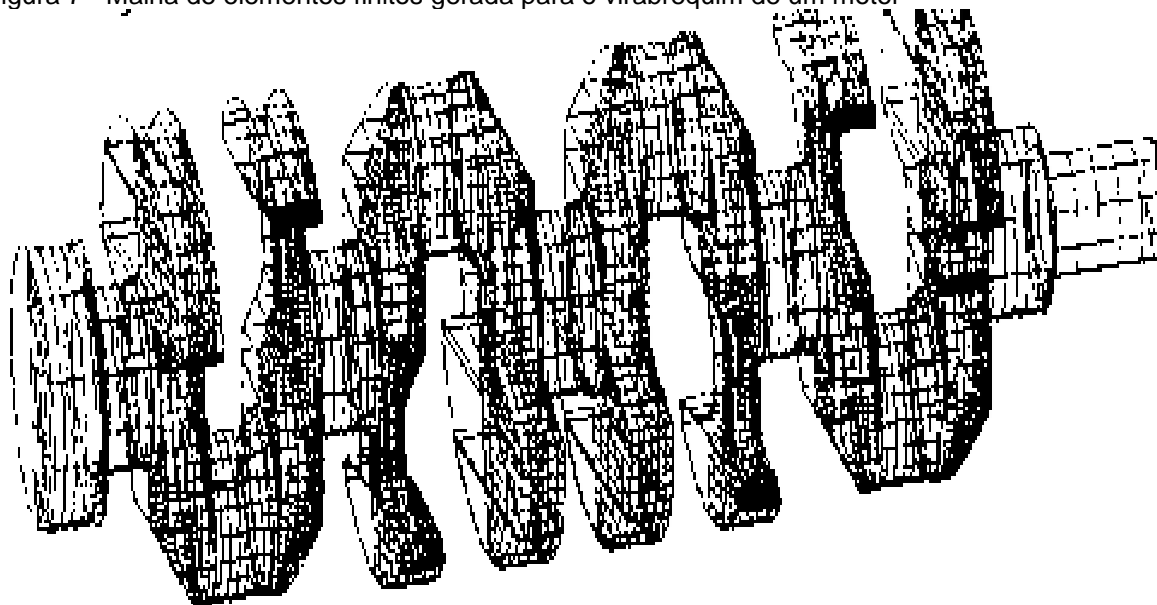
Figura 6 - Viga biapoiada resolvida através do método de elementos finitos



Fonte: Robert L. Norton (2013)

Apesar das dificuldades, a escolha entre um método e o outro é bastante válida devida a baixa complexidade da geometria, e deveriam ser levado em consideração os custos com o software, o treinamento do projetista, tempo de entrega, entre outros. Todavia quando tratadas geometrias complexas como o virabrequim de um motor apresentado na figura 7, a eficiência da utilização do MEF se faz muito clara.

Figura 7 - Malha de elementos finitos gerada para o virabrequim de um motor

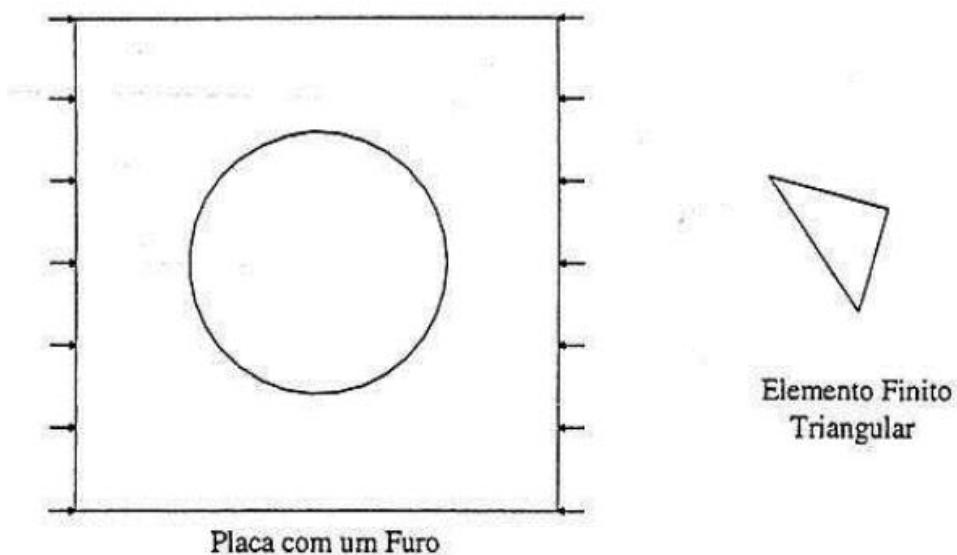


Fonte: Robert L. Norton (2013)

Fish e Belytschko (2007) caracterizam a ideia básica do MEF como a divisão do corpo em elementos finitos, muitas vezes chamados apenas de elementos, conectados por nós e obter uma solução aproximada, essa conexão de elementos e

nós é conhecida por malha de elementos finitos e o processo para sua criação é chamada de geração de malha, a figura 8 apresenta uma geometria na qual deseje-se criar uma análise bem como o elemento triangular básico para a análise.

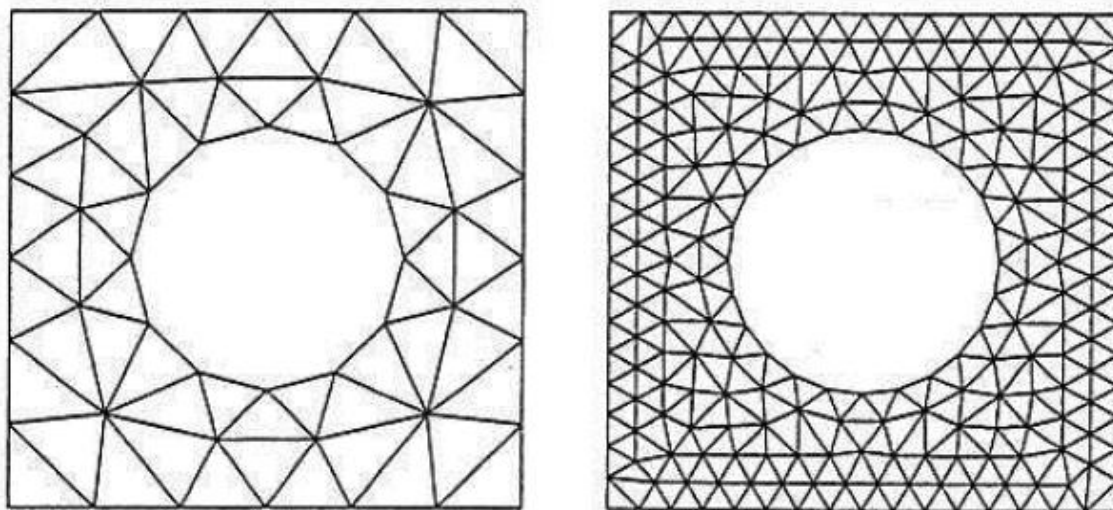
Figura 8 - Peça a ser gerada a malha / elemento triangular básico de uma malha de elementos finitos



Fonte: Fish e Belytschko (2007)

Na figura 9 é apresentada a malha gerada para a geometria apresentada.

Figura 9 - Modelo de malha de elementos finitos simples \ modelo de malha de elementos finitos refinado



Fonte: Fish e Belytschko (2007)

Como pode ser visto na figura 9, podem ser geradas diferentes malhas de elementos finitos para um mesmo elemento, quanto mais complexa for a malha gerada mais precisos serão os resultados, todavia essas análises são geradas em softwares e malhas mais complexas exigem computadores de melhor rendimento, o



que acaba gerando maiores custos, análise da complexidade da malha deve ser feita pelo engenheiro responsável e exige experiência do mesmo.

### 2.3 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

O MEF foi desenvolvido nos anos 1950 pela industrial aeroespacial, Os principais envolvidos foram Boeing e a Bell Aeroespacial nos Estados Unidos e a Rolls Royce no Reino Unido, em 1956, M.J. Turner, R.W. Clough, H.C. Martin e L.J Topp publicaram um dos primeiros artigos no qual expuseram as principais idéias (Turner et al., 1956). Apesar de não usar o termo elementos finitos eles estabeleceram no artigo os métodos para montagem da matriz de elementos bem como suas formulações.

O termo elementos finitos foi usado pela primeira vez por Ray Clough em um congresso de verão da Boeing, quando era professor em Berkeley, seus trabalhos com elementos finitos duraram poucos anos, mas teve muitos seguidores em sua universidade, o que fez com que Berkeley fosse o centro mundial dos estudos na área, os estudos coincidiram com os avanços tecnológicos dos computadores, e a tecnologia rapidamente foi utilizada nas indústrias de energia nuclear, de defesa, automotiva e aeronáutica.

Logo os elementos finitos chamaram a atenção de todo o mundo, alguns se utilizavam do método para resolução de problemas complexos, outrora impossíveis de serem resolvidos tradicionalmente, outros se mantinham céticos quanto ao novo método, de certa forma com razão, pois até o início dos anos 1960 não existiam provas matemáticas que as resoluções do MEF eram de fato confiavam.

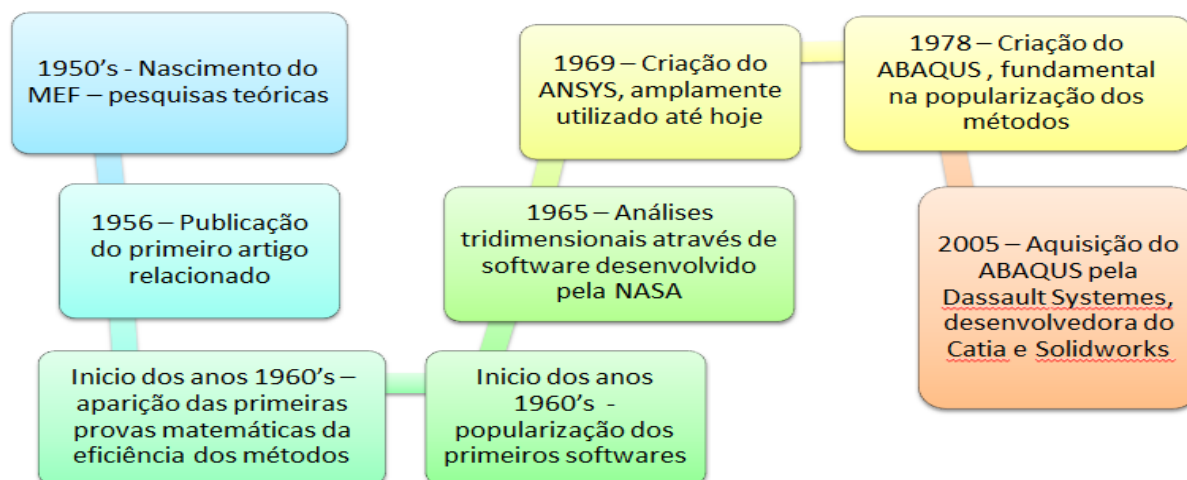
Desta forma não era possível provar que as respostas estavam corretas, isso chamou a atenção de inúmeros matemáticos ao redor do mundo, provando que quanto mais complexa a malha de elementos, mais as respostas convergiam para a solução exata das equações diferenciais.

Um dos primeiros programas amplamente utilizado foi desenvolvido no início dos anos 1960 por E. Wilson, o programa se limitava a análise bidimensional de tensões e era distribuído gratuitamente na época, pois o valor comercial de softwares de computador ainda não existia. Em 1965 começaram a ser feitas análises de tensões tridimensionais, em vigas, elementos de casca e estruturas

complexas, como apresentam Fish e Belytschko (2007), em um enorme investimento feito pela NASA foi criado o programa de análises conhecido como NASTRAN, o programa apresentou inúmeros problemas, que foram resolvidos alguns anos mais tarde pela empresa particular de seus desenvolvedores Dick MacNeal e Bruce McCormick, todavia o projeto já não pertencia mais a NASA, esses comercializaram para a indústria e tiveram papel fundamental na popularização dos métodos.

Em 1969 foi criado outro importante software utilizado amplamente nos dias de hoje, o ANSYS, ele foi criado por John Swanson e se destacava por resolver problemas não lineares. Em 1978 foi criado o software ABAQUS com aplicação para problemas lineares e não lineares, o destaque do programa foi o fato do desenvolvedor, a companhia HKS introduzir portas no programa que permitiam que os utilizadores adicionassem novos modelos e elementos, o software foi vendido em 2005 para a empresa Dassault Systemes, que hoje trabalha com os softwares de CAE Catia e Solidworks, dois dos mais utilizados atualmente, e o segundo no qual as simulações desse trabalho serão geradas, além deles tem grande destaque nos dias de hoje o ANSYS, Pro Engineer e Auto Desk Simulation Mechanical. A figura 10 representa a evolução histórica do MEF.

Figura 10 - Evolução histórica do MEF



Fonte : O Autor (2018)

A evolução do MEF foi bastante grande como pode ser visto na figura 10, mas esses avanços estão bastante ligados ao avanço da tecnologia computacional, logo, cada ano que passa o crescimento da tecnologia e potencializado.

## 2.4 APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

A versatilidade dos métodos de elementos finitos é notável e muito ampla, seria impossível nesse trabalho tratar de forma detalhada todas as aplicações, Fish e Belytschko (2007) apresentam uma lista das mais usuais aplicações, abaixo estão listadas algumas delas, lembrando que o trabalho foca em uma aplicação específica, a análise estrutural de tensões.

- Análise estrutural de tensões em válvulas, tubos, eixos, barras, vasos de pressão, motores automotivos e aeronáuticos;
- Análises térmicas de trocadores de calor, dispositivos elétricos, chips eletrônicos e tubulações;
- Análises de impacto de carros, trens e aeronaves;
- Análise de vibração em componentes mecânicos, represas, cidades, arranha-céus e plantas de potência;
- Análise de escoamentos de líquidos refrigerantes, sistemas de refrigeração, sistemas hidráulicos e seus componentes, e estudos de aerodinâmica em carros, motos, aeronaves, bicicletas, etc;
- Análises eletromagnéticas em antenas, transistores e componentes de aeronaves;
- Análise de procedimentos cirúrgicos;
- Análise de manufatura e fabricação, concentradores de tensão em moldes de fundição.

Com todas essas aplicações e muitas outras aqui não mencionadas fica claro o motivo da popularização dos métodos de análises de elementos finitos nos últimos anos, e cada vez mais com o avanço dos computadores e softwares essa lista tende a aumentar. O campo mais difundido até hoje é o da análise estrutural de tensões, que será o campo utilizado nesse trabalho e abordado de maneira mais específica no item 2.5.

## 2.5 ANÁLISE ESTRUTURAL DE TENSÕES

Os componentes mecânicos de geometria simples podem ter sua análise estrutural de tensões resolvida de maneira clássica, utilizando os métodos tradicionais, todavia quando se tratam de componentes e conjuntos complexos o projetista teria um trabalho infinitamente grande para atingir resultados que muitas vezes nem seriam satisfatórios, nesses casos a aplicação do método de elementos finitos é imprescindível, segundo Budynas e Nisbett (2011) a análise estrutural por elementos finitos se dá com a divisão (discretização) da estrutura em pequenas porém finitas partes, através de funções polinomiais e operações matriciais é resolvido o comportamento de cada elemento baseado nas propriedades geométricas e do material, são aplicadas também as cargas nesse elemento, que vão se comportar de maneira diferente em cada elemento.

A junção dos elementos é feita pelos nós, esses são de grande importância para as análises pois é normalmente neles que as condições elásticas dos materiais são estabelecidas, cada nó possui um determinado número de graus de liberdade, isso é um número de possíveis direções de rotação e translação.




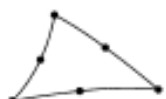
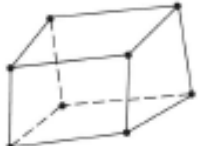

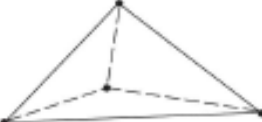



A resolução das equações estruturais é feita individualmente para cada elemento e então amarrada pelos seus respectivos nós, com as condições de contorno e carga definidos são resolvidos os graus de liberdade para cada nó, o deslocamento desses nós após a aplicação das cargas determina as resistências e tensões do componente.

### 2.5.1 Geometria Dos Elementos

Budynas e Nisbett (2011) apresentam diferentes geometrias para os elementos finitos gerados em uma análise, a utilização de cada um depende principalmente da geometria do componente mecânico analisado. As diferentes geometrias se encontram nos softwares no que é chamada de biblioteca de elementos. Em geral esses são separados em quatro categorias: elementos lineares, elementos de superfície, elementos sólidos, e elementos com finalidades especiais. A figura 11 apresenta o modelo e aplicação de cada uma dessas categorias, é importante lembrar que o tipo de elemento também está ligado aos

graus de liberdade de seu nó e alguns tipos de elementos não permitem determinados números de graus de liberdade.

Figura 11 - Tipos de elementos e aplicações

Tipo de elemento	Nenhum	Forma	Número de nós	Aplicações
Superfície	Quadrilateral de 4 nós		4	Tensão ou deformação plana, axissimetria, painel em cisalhamento, chapa plana fina em flexão.
	Quadrilateral de 8 nós		8	Tensão ou deformação plana, chapa fina ou armação em flexão.
	Triangular de 3 nós		3	Tensão ou deformação plana, axissimetria, painel em cisalhamento, chapa plana fina em flexão. Prefira elementos quadriláteros sempre que possível. Usado para transições de elementos quadriláteros.
	Triangular de 6 nós		6	Tensão ou deformação plana, axissimetria, painel em cisalhamento, chapa fina ou casca em flexão. Prefira elementos quadriláteros sempre que possível. Usado para transições de elementos quadriláteros.
Sólido	Hexagonal de 8 nós (tijolo)		8	Chapa grossa sólida.
	Pentagonal de 6 nós (cunha)		6	Chapa grossa sólida. Usada para transições.
	Tetraédrico de 4 nós (tetra)		4	Chapa grossa sólida. Usada para transições.
Finalidade especial	Intervalo		2	Deslocamento livre para intervalo de compressão prescrito.
	Gancho		2	Deslocamento livre para intervalo de compressão prescrito.
	Rigido		Variável	Restrições rígidas entre nós.

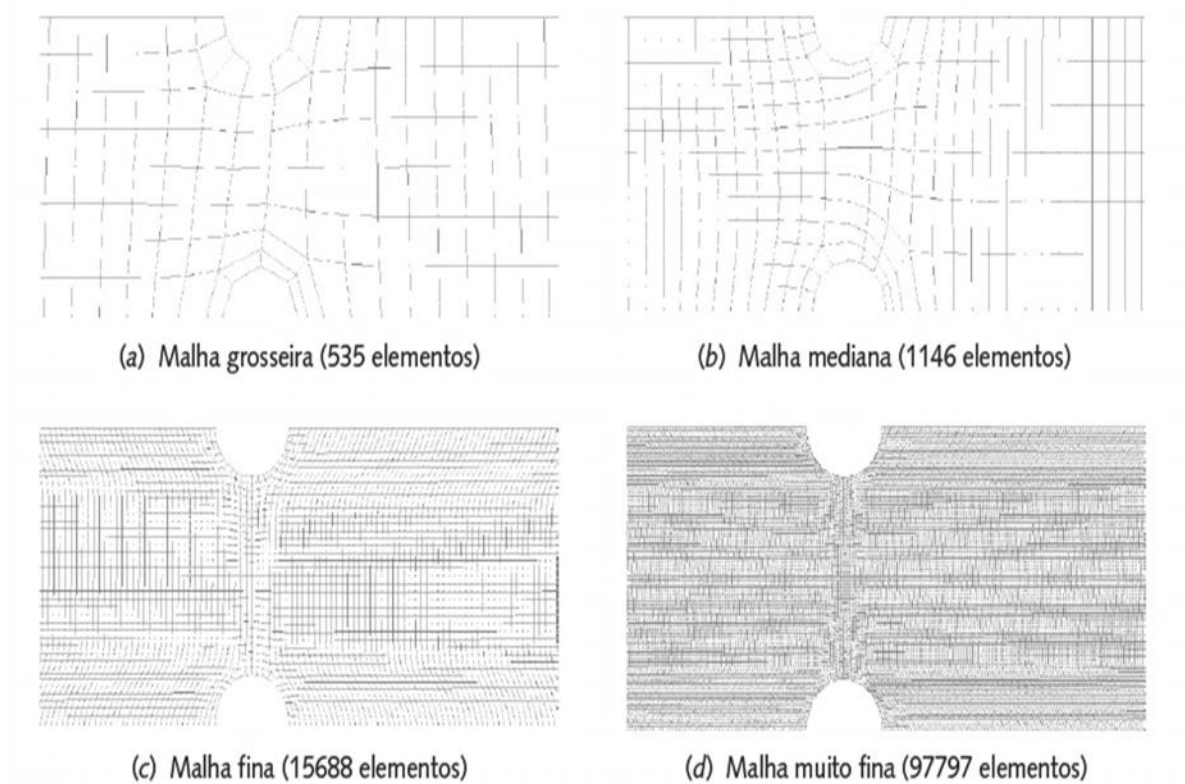
Fonte : Budynas e Nisbett (2011)

Como pode ser visto na figura 11 são inúmeras os tipos de elementos aplicáveis, cabe ao engenheiro responsável pela análise escolher o estilo que melhor se aplica ao seu problema.

## 2.5.2 Geração de malha

A rede de elementos e nós recebe o nome de malha, quanto maior o número de elementos na malha, maior sua densidade, mais precisos serão os cálculos, mais caros e mais lentos também. É chamado de refinamento da malha a operação feita após uma análise onde se procura melhorar os resultados, sejam por precisão, custos ou tempo, o refinamento também pode ser feito em áreas específicas onde a antiga malha demonstra pontos com elevados níveis de tensão, mas não de maneira detalhada, de maneira geral as malhas menos refinadas são preferíveis, devido a redução de tempo e custos, a figura 12 apresenta diferentes densidades de malha para um mesmo componente.

Figura 12 - Diferentes densidades de malhas para o mesmo elemento



Fonte: Robert L. Norton (2013)

Budynas e Nisbett (2011) classificam a geração de malhas de três maneiras:

- Geração manual de malha;
- Geração semi automática de malha;
- Geração de malha completamente automatizada;

Nesse trabalho será abordado apenas o ultimo método de geração de malhas.

### 2.5.3 Aplicação De Carga

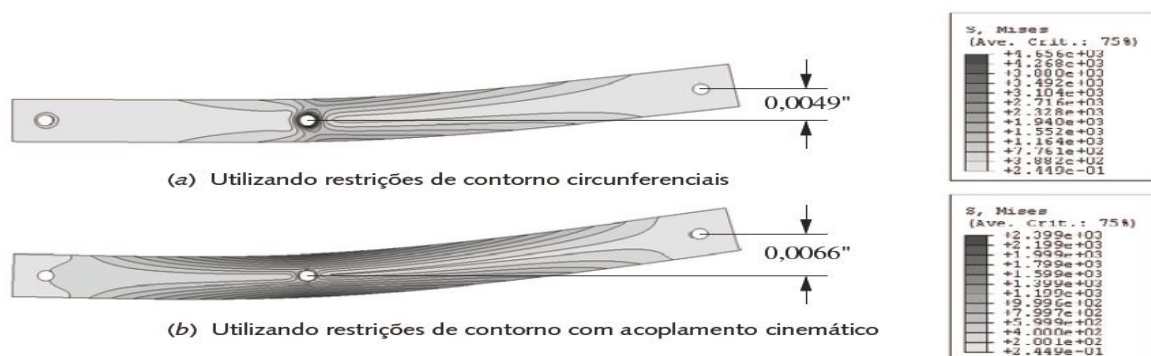
A aplicação da carga em um software de elementos finitos vai muito além da simples inserção de valores, é preciso experiência do projetista, conhecimentos em física, elementos de máquinas entre outros, uma visão errada do problema pode causar consequências desagradáveis, devem ser tomados cuidados na aplicação da carga em relação aos seus sentidos e também com os efeitos da gravidade.

São inúmeros os modelos de carregamento disponíveis nos softwares, entre eles estão, forças tangenciais, forças radiais, torques, gravidade, força de contato, carregamento de pressão, etc. outra importante consideração a ser feita nas aplicações de carga são as unidades utilizadas, diferentes softwares possuem diferentes padrões de unidades de medida, e isso deve ser levado em conta.

### 2.5.4 Condições De Contorno

Assim como na aplicação de carga as condições de contorno (CC) também exigem dos projetistas habilidades no momento da análise prévia do problema, são inúmeras as condições de restrição na prática como rolamentos, engastes, chavetas, soldas entre outros, mas a transição dessas restrições para um modelo analítico em um software requer um pouco de prática, a figura 13 apresenta uma peça, com a mesma intensidade de carga aplicada, porém com condições de contorno diferentes, é possível ver facilmente a enorme diferença de tensões geradas.

Figura 13 - Diferentes condições de contorno para uma mesma carga aplicada



Fonte: Robert L. Norton (2013)

Pode ser observado que a determinação das condições de contorno de maneira correta é primordial para a resolução da análise, uma interpretação equivocada nesse momento pode resultar em falhas catastróficas.

## 2.6 SINTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O capítulo 2 apresentou os princípios básicos do funcionamento de uma análise de elementos finitos, o histórico do método e como ele ganhou popularidade, suas diversas áreas de aplicação e por fim a metodologia de aplicação da análise para análises estruturais de tensão, que engloba a geração da malha, as condições de contorno a aplicação da carga e os materiais de fabricação.

A proposta do presente trabalho é a utilização de métodos de elementos finitos como ferramenta de manutenção preditiva, para isso se faz importante o conhecimento de algumas técnicas utilizadas, bem como os campos de aplicação, pois esses mostram as diversas áreas onde se pode utilizar o conceito da análise também para auxílio das equipes de manutenção.

Com a apresentação da metodologia de geração da análise é possível uma visão geral de uma análise estrutural, isso é de grande importância no restante do trabalho principalmente no momento da análise do eixo rotativo no qual o trabalho da maior foco e visa resultados positivos quanto as suas rotinas de manutenção.

O capítulo 3 fala sobre os tipos de manutenção, dando enfoque na manutenção preditiva, onde conceitua a mesma e mostra a possibilidade da aplicação das ferramentas até aqui apresentadas como forma de manutenção preditiva.

Assim como no capítulo 2, o capítulo 3 apresenta a evolução histórica da manutenção preditiva e sua importância na gestão de ativos nos dias de hoje na indústria, será apresentado como ela pode se aplicar no caso estudado por esse trabalho e sua ligação com a análise de elementos finitos.



### **3 MANUTENÇÃO PREDITIVA E ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Este capítulo apresenta os conceitos, histórico e aplicações da manutenção preditiva e engenharia de manutenção, assim como a importância dentro da política de manutenção de uma empresa e na gestão de ativos da mesma.

A abordagem utilizada nesse capítulo visa esclarecer os conceitos básicos dessas duas modalidades da manutenção, com intuito de permitir a utilização dos conceitos abordados no capítulo anterior de análise de elementos finitos.

#### **3.2 ASPECTOS GERAIS DE MANUTENÇÃO**

Para Kardec e Nascif (2009) a missão da manutenção moderna é garantir a confiabilidade e disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender um processo de produção ou de serviço, com segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados. Essa definição é também encontrada na literatura de Nascif e Dorigo (2010).

Ainda segundo Kardec e Nascif (2009) essa nova missão da manutenção vem substituir um antigo conceito, onde a missão da manutenção era reestabelecer as condições originais do ativo.

Segundo Kardec e Nascif (2013) a manutenção tem função estratégica dentro do negócio, mas para isso precisa estar voltada para os resultados empresariais. Ela precisa não ser apenas eficiente, mas eficaz, não basta simplesmente fazer a manutenção de maneira rápida, mas de maneira a aumentar a disponibilidade do equipamento e reduzindo a probabilidade de paradas inesperadas.

Kardec e Nascif (2013) classificam como inaceitável nos dias de hoje que um equipamento pare de maneira inesperada ou sem planejamento, uma parada não planejada é considerada um fracasso para a manutenção, as equipes de manutenção não devem atuar apenas nas falhas, mas sim atuar para que essas não ocorram mais.

A partir desses pensamentos justificasse a aplicação das técnicas preditivas e engenharia de manutenção, evitando possíveis falhas aleatórias e oferecendo aos equipamentos maior confiabilidade e disponibilidade.

A manutenção está dividida para Kardec e Nascif (2013) em seis:

- Corretiva não planejada;
- Corretiva planejada;
- Preventiva;
- Preditiva;
- Detectiva;
- Engenharia de manutenção.

Essas são apresentadas na figura 14 em função da evolução das técnicas de manutenção.

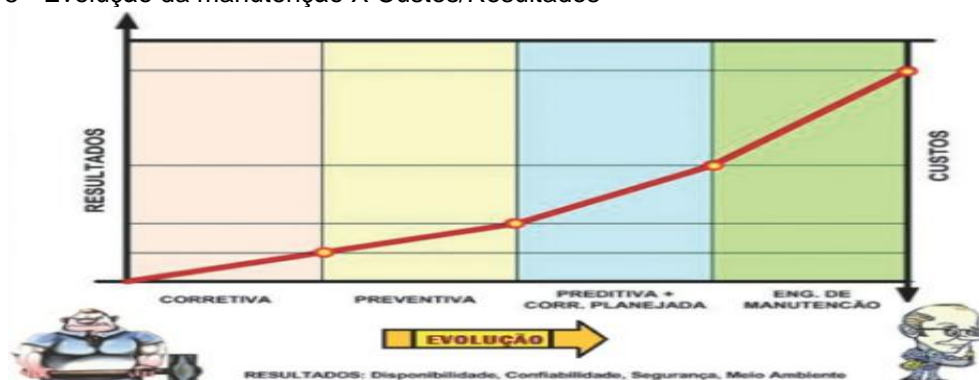
Figura 14 - Tipos de manutenção



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

Enquanto a figura 15 apresenta a evolução dos tipos de manutenção versus custos e resultados.

Figura 15 - Evolução da manutenção X Custos/Resultados



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

O presente trabalho foca nas técnicas de manutenção preditiva e engenharia de manutenção, e essas serão abordadas de maneira mais profunda nas seções subsequentes.

### 3.3 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Para Kardec e Nascif (2009) nenhuma outra atividade teve evolução maior nos últimos 30 anos do que a atividade de manutenção, e essas alterações se devem para eles pelos seguintes fatores:

- Aumento, bastante rápido, do número e da diversidade dos itens físicos (instalações, equipamentos e edificações) que tem que ser mantidos;
- Projetos muito mais complexos;
- Novas técnicas de manutenção;
- Novos enfoques sobre a organização da manutenção e suas responsabilidades;
- Importância da manutenção como função estratégica para melhoria dos resultados do negócio e aumento da competitividade das organizações.

A manutenção foi dividida historicamente por Kardec e Nascif (2009) em quatro gerações, como apresenta a tabela 3. A primeira geração abrange o período anterior à segunda guerra mundial, os equipamentos eram superdimensionados, de baixa complexidade, e devido ao fato da produtividade não ser prioridade as estratégias de manutenção também não eram. Portanto se limitavam basicamente a limpezas, lubrificações e reparos após a quebra, a competência que se buscava era a habilidade do mantenedor em realizar o reparo necessário.

A segunda geração aconteceu nos anos 60 e 70, a segunda guerra obrigou que fossem fabricados produtos dos mais diversos tipos, enquanto a mão de obra foi reduzida. Isso levou a uma mecanização do maquinário e um aumento de complexidade. Ficou evidente nesse momento a necessidade de se buscar maiores confiabilidades e disponibilidades dos equipamentos, a ideia de que para isso as falhas deveriam ser evitadas resultou no conceito de manutenção preventiva. Essas paradas eram feitas em intervalos fixos, esses fatores levaram a um aumento considerável dos custos de manutenção em relação a outros custos de produção, isso fez aumentar os sistemas de planejamento e controle da manutenção.

A partir da década de 70 teve início à terceira geração, nesse momento as grandes paradas para manutenção já não eram mais aceitas, pois essas

impactavam nos custos de produção e qualidade do produto. Esses fatores reforçaram o conceito e utilização da manutenção preditiva e reforça a utilização do conceito de confiabilidade pela engenharia de manutenção, porém a falta de comunicação entre as áreas de engenharia, manutenção e operação impediam que fossem alcançados melhores resultados.

Na quarta geração a disponibilidade e a confiabilidade ganham ainda mais importância, e a manutenibilidade também passa a ter grande importância, a priorização da manutenção está na diminuição das falhas prematuras, a análise de falhas se torna uma metodologia consagrada e o objetivo de intervir cada vez menos nos processos leva a uma altíssima utilização das práticas de manutenção preditiva e monitoramento das condições do equipamento, e na quarta geração que as paradas não programadas começam a ser consideradas fator de fracasso da manutenção, uma melhor integração entre engenharia, manutenção e operação leva a projetos com maiores índices de disponibilidade e confiabilidade.

Tabela 3 - Evolução da manutenção

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO									
	Primeira Geração		Segunda Geração		Terceira Geração		Quarta Geração		
Ano	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010	→
Aumento das expectativas em relação a	* Conserto após a falha		* Disponibilidade crescente * Maior vida útil do componente		* Maior confiabilidade * Maior disponibilidade * Melhor relação custo-benefício * Preservação do meio ambiente		* Maior confiabilidade * Maior disponibilidade * Segurança * Preservação do meio ambiente * influir nos resultados do negócio * gerenciar os ativos		
Visão quanto a falha do	* Todos os equipamentos se desgastam com a idade, e por isso falham		* todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira		* Existência de 6 padrões de falhas		* Reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões		
Mudanças nas técnicas de manutenção	* Habilidades voltadas para o reparo		* Planejamento manual da manutenção * Computadores grandes e lentos * Manutenção preventiva (por tempo)		* Monitoramento da condição * Manutenção preditiva * Análise de risco * Computadores pequenos e rápidos * Softwares potentes * Grupos de trabalho multidisciplinares * Projetos voltados para a confiabilidade * Contratação por mão de obra e serviços		* Aumento da manutenção preditiva e monitoramento da condição * Minimização nas manutenções preventiva e corretiva não planejada * Análise de falhas * Técnicas de confiabilidade * Manutenibilidade * Engenharia de manutenção * Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e custo de ciclo de vida * Contratação por resultados		

Fonte: Kardec e Nascif (2009)

Todas as gerações deixaram sua contribuição histórica para a manutenção, é importante reconhecer as vantagens e desvantagens de cada uma, e utilizar isso na gestão da manutenção.

### 3.4 MANUTENÇÃO PREDITIVA

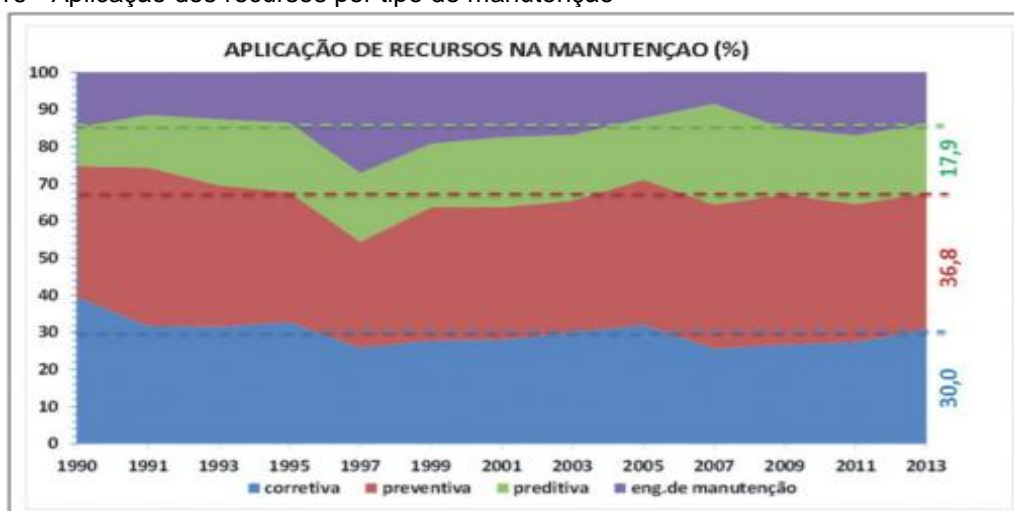
Para Nascif e Dorigo (2010) “manutenção preditiva é a atuação realizada com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática” (NASCIF-DORIGO, 2010, p. 144).

Para Nepomuceno (1989, pag. 43) “manutenção preditiva é a execução da manutenção preventiva no momento adequado, antes que o equipamento quebre”. As medições podem ser executadas de forma contínua ou em intervalos periódicos, dependendo da criticidade do equipamento e do impacto do problema.

Este tipo de manutenção para Pinto e Xavier (2001, pag.41) é também conhecida por manutenção sob condição, indica as condições reais de funcionamento das máquinas, com base em dados que informam seus desgaste ou tendência de degradação.

Os diversos autores classificam a manutenção preditiva como o tipo de manutenção que propicia os melhores resultados, todavia a Abraman mostra que sua utilização no Brasil ainda é bem pequena em relação aos benefícios que a mesma pode trazer, a figura 16 mostra a divisão de recursos por tipo de manutenção.

Figura 16 - Aplicação dos recursos por tipo de manutenção



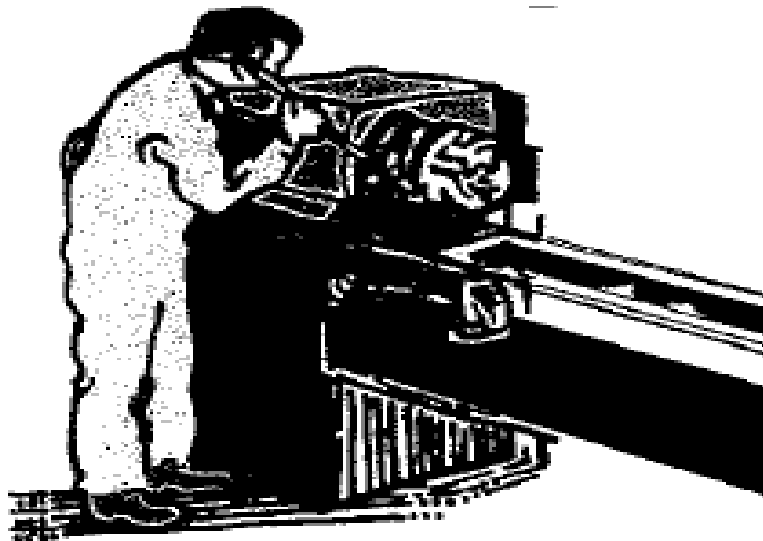
Abraman (2013)

Segundo Kardec e Nascif (2013) a substituição de manutenção preventiva por manutenção preditiva pode apresentar uma redução de 8% a 12% nos custos de manutenção, e em algumas instalações onde existe predominância da manutenção corretiva não planejada essa redução pode chegar a 30%.

#### 3.4.1 Principais Técnicas Preditivas

Para Kardec e Nascif (2013) o monitoramento dos equipamentos pode ser classificado em monitoramento subjetivo e monitoramento objetivo, o monitoramento subjetivo é aquele feito através dos sentidos, da visão, olfato, tato e audição, como pode ser visto uma inspeção por audição na figura 17, enquanto o monitoramento objetivo é feito por meio de aparelhos ou instrumentos que indicam um parâmetro a ser acompanhado.

Figura 17 - Acompanhamento subjetivo de ruído



Fonte: Kardec e Nascif (2009)

O monitoramento subjetivo é importante, porém tende a não apresentar um padrão confiável, pois varia da sensibilidade e experiência de cada mantenedor, o monitoramento objetivo elimina o grau de incerteza na medição, mas ainda existe o grau de incerteza de diagnóstico, e segundo Kardec e Nascif (2013) esse depende de cinco fatores:

- Qualidade e precisão da medição;
- Acompanhamento da tendência;
- Conhecimento por quem está analisando os dados;

- Ambiência favorável ou não da empresa;
- Confiança da média gerência no diagnostico dos seus técnicos.

O monitoramento objetivo pode ainda ser dividido em monitoramento objetivo offline, que é feito em intervalos regulares e deve obedecer a um plano de manutenção preditiva, e monitoramento objetivo online ou monitoramento contínuo que informa continuamente através de sensores e indicadores os parâmetros do equipamento.

Dentre a técnicas preditivas mais utilizadas estão a análise de vibração, temperatura, óleo lubrificante, óleo isolante, som/ruído e espessura de parede, cada uma dessa será abordada nas seções subseqüentes.

#### 3.4.1.1 Análise De Vibração

A análise de vibração está entre as técnicas de monitoramento mais antigas e utilizadas, sua aplicação se concentra nas máquinas rotativas dentre as quais estão motores elétricos, bombas centrifugas, redutores, compressores e ventiladores.

As análises seguem os conceitos básicos de vibração dentro da engenharia mecânica, segundo a definição de Rao (2009) qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominada vibração ou oscilação, a teoria de vibração trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles.

Os parâmetros de vibração associados a máquinas rotativas estão normalmente associados a 3 parâmetros: deslocamento, velocidade e aceleração, e suas equações são respectivamente a 1,2 e 3 conforme apresentadas.

$$\text{Deslocamento} - x = A \text{ sen } \omega t \text{ (Equação 1)}$$

$$\text{Velocidade} - v = A\omega \text{ cos } \omega t = \frac{dx}{dt} \text{ (Equação 2)}$$

$$\text{Aceleração} - a = A\omega^2 \text{ sen } \omega t = \frac{dv}{dt} \text{ (Equação 3)}$$

Onde:

$A$  = Amplitude do vetor de zero a pico em mm

$\omega$  = Velocidade angular em  $\frac{\text{rad}}{\text{seg}}$ .

$t$  = Tempo em segundos

Substituindo  $\omega = 2\pi f$  nas equações de deslocamento, velocidade e aceleração observamos que:

- A amplitude de deslocamento independe da frequência;
- A amplitude de velocidade crescerá proporcionalmente a frequência;
- A amplitude de aceleração crescerá com o quadrado da frequência;

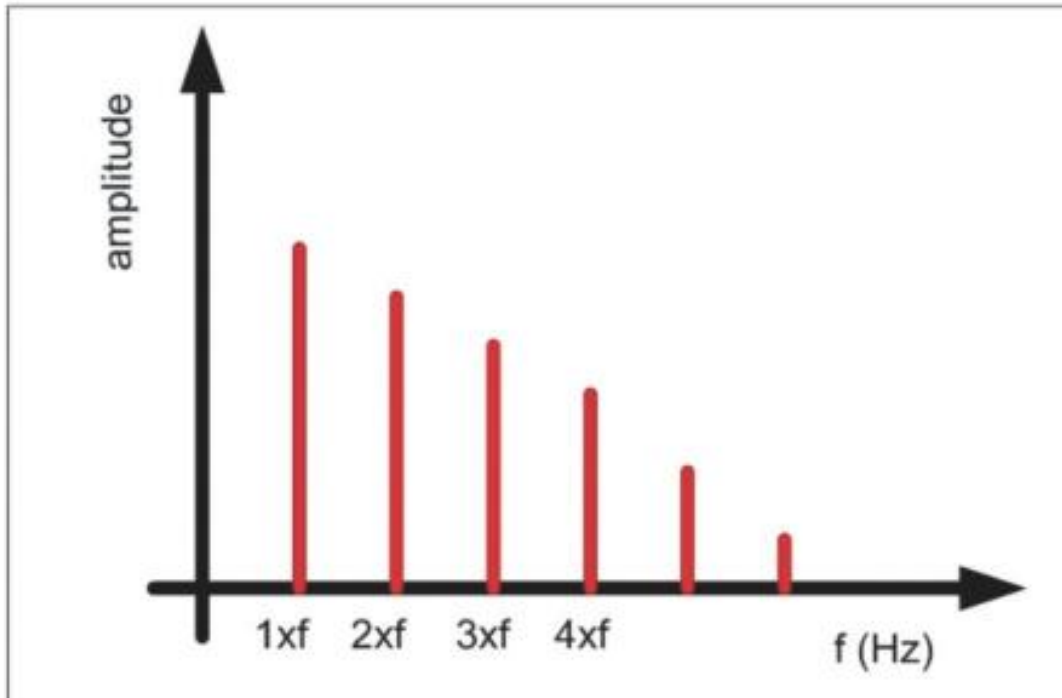
Assim temos as seguintes relações:

$$v = 2\pi f A \text{ (Equação 4)} \text{ e } a = (2\pi f)^2 A \text{ (Equação 5)}$$

Essas relações ajudam a entender qual variável deve ser acompanhada em uma análise de vibração.

Segundo Kardec e Nascif (2013) todo equipamento possui uma frequência considerada fundamental, e essa é igual a rotação do equipamento, as outras frequências múltiplas da fundamental formam o que é conhecido como harmônico no espectro de vibração, a análise desse espectro vai dizer o tipo de defeito presente no equipamento, a figura 18 apresenta um espectro de vibração (Gráfico deslocamento x frequência).

Figura 18 - Espectro de vibração

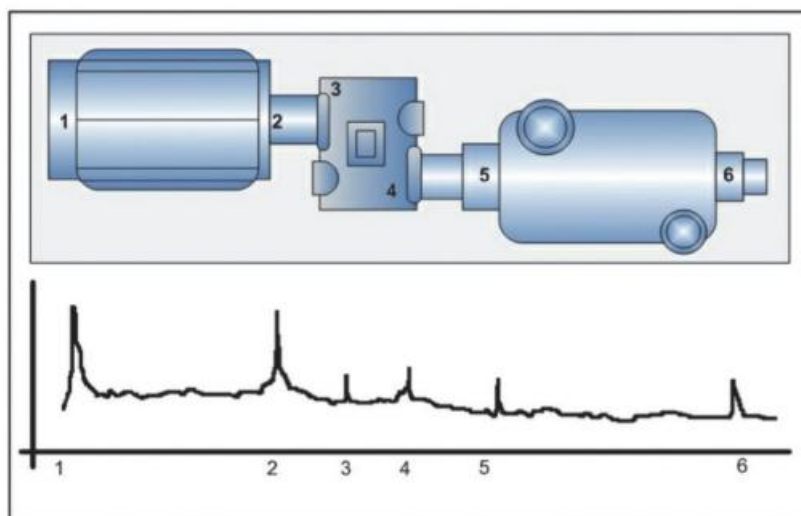


Fonte: Kardec e Nascif (2013)

Enquanto a figura 19 mostra um espectro para um motor elétrico, redutora, compressor centrífugo. Pelo espectro é possível ver a amplitude para cada mancal das máquinas.



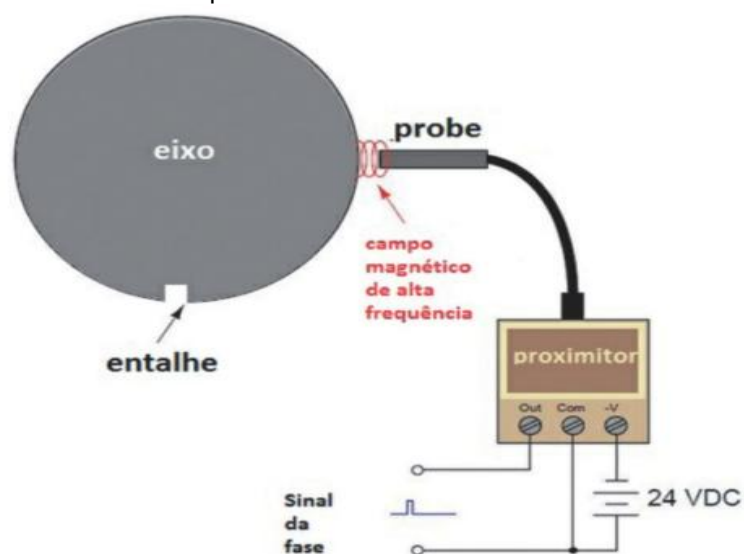
Figura 19 - Espectro de vibração 2



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

Os sensores mais utilizados para as medições de vibração são os eletromagnéticos e capacitivos e os acelerômetros. Entre os sensores capacitivos esta o probe, normalmente são instalados do lado interno da máquina e detectam o movimento do eixo em relação ao mancal, captam as diferenças de distância entre os vários pontos do eixo. O probe é excitado por uma determinada frequência gerada pelo aparelho chamado proximitor e transmitida por um cabo, essa excitação produz um campo magnético que é transmitido a ponta do probe, quando a ponta do probe fica próxima a uma superfície condutora (eixo) correntes são induzidas e captadas as diferenças de tensão geradas, permitindo a medição. Um esquema é apresentado na figura 20.

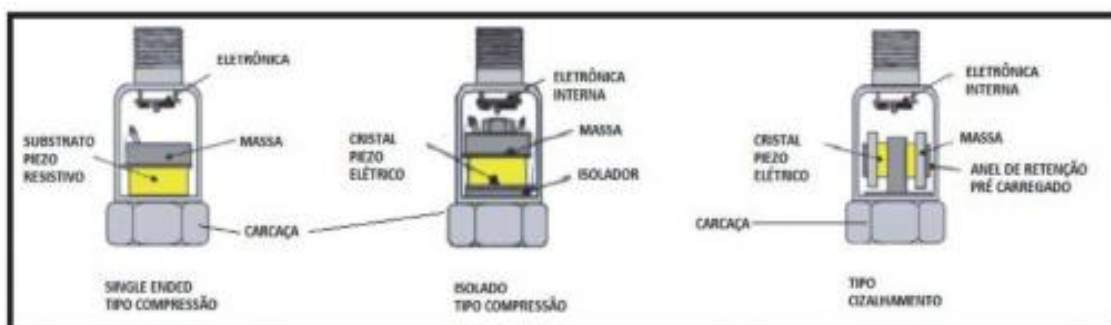
Figura 20 - Medição feita através de probe



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

O outro tipo de sensor amplamente utilizado na indústria hoje é o acelerômetro, o tipo mais encontrado é o piezoelétrico, e esse pode ser constituído por um ou mais cristais piezo elétricos, eles são pré tensionados por uma massa e montados em uma carcaça, quando comprimidos ou sujeitos a uma força de cisalhamento eles emitem um sinal elétrico, quando os sensores são sujeitos a uma vibração eles respondem com a alteração da tensão medida, a figura 21 apresenta uma representação esquemática desses sensores.

Figura 21 - Tipos de acelerômetros 1



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

Na figura 22 são mostradas imagens reais desses mesmos acelerômetros.

Figura 22 - Tipos de acelerômetros 2



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

A escolha do melhor sensor bem como o método de medição deve ser avaliada para cada caso levando em consideração alguns fatores importantes, como a diferença de massa entre carcaça do equipamento a ser medido e o elemento de rotação, a faixa de frequência a ser analisada entre outros fatores.

Além dos sensores existem equipamentos comerciais para medição de vibração, esses são chamados vibrômetros, esses são capazes de medir a amplitude de deslocamento e velocidade em várias faixas ajustáveis por um seletor, na figura 23 pode-se ver o equipamento.

Figura 23 - Vibrômetros



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

Um outro tipo de vibrômetro é a caneta SKF que possui um sensor piezoelétrico e é mostrado na figura 24.

Figura 24 - Canetas de vibração



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

Dentre os principais equipamentos existem ainda os analisadores de medição, esses são instrumentos que permitem uma varredura do sinal de vibração possibilitando encontrar a origem ou causa do problema, a figura 25 mostra um exemplo.

Figura 25 - Analisador de medição



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

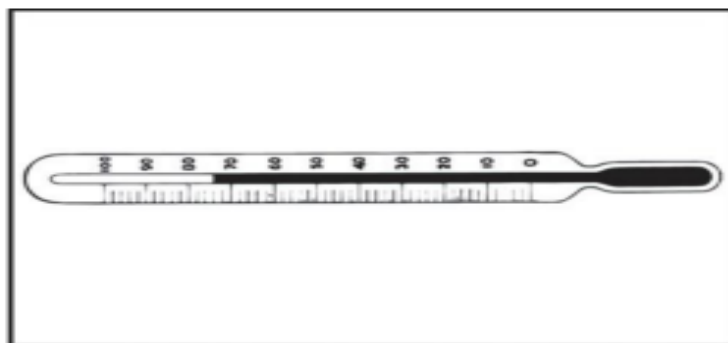
Outros importantes aspectos nas medições de vibração são os sistemas de monitoramento, cada vez mais são utilizados sistemas online com a menor interferência possível do fator humano.

#### 3.4.1.2 Análise De Temperatura

O acompanhamento da temperatura é um dos mais simples a serem feitos, suas aplicações são amplas como o acompanhamento da temperatura de mancais em máquinas rotativas, a temperatura da superfície de equipamentos estacionários, temperatura em barramentos e equipamentos elétricos, etc.

A medição da temperatura pode ser feito através de termômetros de efeito mecânico, termômetros de efeito elétrico e medidores por radiação. Um dos termômetros de efeito mecânico é o de expansão de líquido mostrado na figura 26.

Figura 26 - Termometro por expansão de líquido



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

Um outro exemplo de termômetro de efeito mecânico é o bi-metálico, esse é apresentado na figura 27.

Figura 27 - Termometro bi-metálico



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

No grupo dos termômetros por efeito elétrico estão os termômetros por resistência, desses termômetros os que utilizam condutores são denominados de resistência ou termo resistência, e os que utilizam semi condutores são chamados termistores, alguns termopares industriais são apresentados na figura 28.

Figura 28 - Termopares industriais



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

O grupo de termômetros por radiação se difere dos anteriores por não precisar estar em contato com o equipamento que se deseja medir, a temperatura é captada por radiação, um termômetro de infra vermelho é apresentado na figura 29.

Figura 29 - Termômetros infravermelho



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

Entre os termômetros de radiação estão os termovisores, esses são compostos por uma câmera e uma unidade de vídeo, a câmera contém o sistema ótico, mecanismos de varredura horizontal e vertical, o detector e um sistema para resfriamento dele, algumas câmeras termográficas são apresentadas na figura 30.

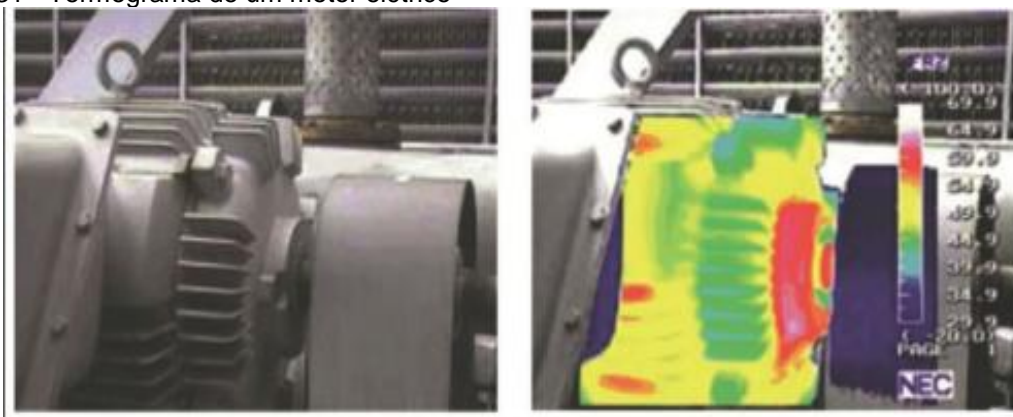
Figura 30 - Câmeras termográficas



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

Para Kardec e Nascif (2013) a termografia é a técnica preditiva que permite o acompanhamento de temperaturas e a formação de imagens térmicas, conhecidas por termogramas, o termograma de um motor na figura 31.

Figura 31 - Termograma de um motor elétrico



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

As análises termográficas representam um papel de elevada importância dentro da manutenção preditiva e engenharia de manutenção, sua evolução está também diretamente ligada aos avanços tecnológicos.

#### 3.4.1.3 Análise Do Lubrificante

A análise de lubrificante possui duas técnicas bastante difundidas, a análise física química e a ferrografia, a análise físico química implica na retirada de amostras em intervalos regulares, e o acompanhamento das mesmas, a alteração das condições originais do óleo pode indicar a necessidade de intervenção, alguns cuidados devem ser levados em conta na retirada das amostras, pois essas podem sofrer com contaminação, as análises geradas pelo lubrificante recebem o nome de ferrograma, alguns desses ensaios são mostrados na figura 32.

Figura 32 - Exemplos de ferrogramas



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

A ferrografia faz uma análise detalhada nas partículas encontradas no óleo, ela analisa a morfologia, acabamento superficial, coloração, natureza e o tamanho

das partículas, e com isso pode se dizer o modo e o tipo de desgaste do equipamento analisado, as amostras são retiradas e analisadas em microscópios.

#### 3.4.1.4 Óleos Isolantes

A análise dos óleos isolantes é segundo Kardec e Nascif (2013) similar as do item anterior, a diferença é a aplicação desses óleos, eles são utilizados principalmente em transformadores, reatores, chaves elétricas, disjuntores entre outros, para cumprir a função de isolante esse deve estar totalmente livre de umidade e contaminantes.

As técnicas que se destacam nessa análise são a análise cromatográfica ou cromatografia e a análise físico-química, a análise cromatográfica é basicamente uma análise dos gases presentes no óleo, enquanto que a análise físico-química é bastante similar a análise feita nos óleos lubrificantes, e essa é capaz de identificar os teores de água presentes, a rigidez dielétrica do óleo, o nível de acidez, a tensão superficial, a massa específica e densidade relativa do óleo.

#### 3.4.1.5 Análises De Sons/Ruídos

O monitoramento do ruído também é uma técnica explorada na manutenção preditiva, normalmente essa é utilizada em conjunto com outras técnicas para oferecer um diagnóstico mais preciso, os equipamentos convertem sinais ultrassônicos em padrões que podem ser analisados, um equipamento ultrassônico é apresentado na figura 33.

Figura 33 - Equipamento ultrassônico



Fonte: Kardec e Nascif (2013)



A importância dos equipamentos ultrassônicos é comprovadamente grande para a manutenção preditiva, porém sua eficiência está ligada à associação correta com outros métodos para cada aplicação.

#### 3.4.1.6 Espessura De Parede

Largamente utilizado em equipamentos submetidos a pressão como tanques, vasos de pressão e tubulações, as paredes desses equipamentos são dimensionados em projeto para suportar os esforços de operação, mas com o passar dos anos a espessura da parede pode diminuir devido à corrosão, erosão e abrasão, o monitoramento desses equipamentos é de fundamental importância para a segurança dos colaboradores, a figura 34 mostra um vaso de pressão rompido após a diminuição excessiva da espessura da parede.

Figura 34 - Vaso de pressão rompido



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

São inúmeros os tipos de medidores de espessura, e esses são relativamente baratos diante dos benefícios que trazem as companhias, alguns desses equipamentos são apresentados na figura 35.

Figura 35 - Medidores de espessura



Fonte: Kardec e Nascif (2013)

Os medidores de espessura podem ser equipamentos relativamente baratos se levados em consideração os tipos de danos que podem ser causados sem um correto acompanhamento de equipamentos críticos como os aqui citados.

### 3.5 ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO

É considerada por Kardec e Nascif (2009) como a segunda quebra de paradigma da manutenção, praticar a engenharia de manutenção exige uma mudança cultural, a engenharia de manutenção se dedica a consolidar a rotina e implantar a melhoria, Kardec e Nascif (2009) ainda listam as principais atribuições da engenharia de manutenção:

- Aumentar a confiabilidade;
- Aumentar a disponibilidade;
- Melhorar a manutenabilidade;
- Aumentar a segurança;
- Eliminar problemas crônicos;
- Solucionar problemas tecnológicos;
- Melhorar a capacitação do pessoal;
- Gerir materiais e sobressalentes;
- Participar de novos projetos;
- Dar suporte a execução;
- Fazer análise de falhas e estudos;
- Elaborar planos de manutenção e de inspeção e fazer sua análise crítica;

- Acompanhar os indicadores;
- Zelar pela documentação técnica.

A engenharia de manutenção precisa estar alinhada com o que acontece no mundo, as principais tecnologias, as novas ferramentas de gestão e perseguindo os benchmarks.

### 3.6 SINTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O capítulo 3 apresentou uma visão geral sobre a manutenção industrial, sua evolução histórica, os conceitos básicos de manutenção preditiva bem como suas técnicas mais utilizadas e os conceitos de engenharia de manutenção.

Conhecer a evolução dos tipos de manutenção, os conceitos de manutenção preditiva, suas ferramentas e aplicações ajudam a entender de que maneira essa pode se encaixar na análise de elementos finitos, e como essa pode vir a se tornar uma ferramenta de análise usual.

Os conhecimentos e aplicações da engenharia de manutenção delimitam os campos de aplicação da ferramenta de análise de elementos finitos, **o** mostram até onde o engenheiro de manutenção pode atuar em relação ao problema neste trabalho abordado, o rolo aplicador de pintura.

O capítulo 4 aborda os temas aqui apresentados de maneira a utiliza-los em uma aplicação real, verificando a eficiência das ferramentas e conceitos da manutenção preditiva e engenharia de manutenção.

Serão apresentados no próximo capítulo as análises de elementos finitos geradas para o rolo aplicador, essas análises serão utilizadas como uma ferramenta de manutenção preditiva, e seus resultados têm por objetivo auxiliar nas tomadas de decisão, colocando em prática a engenharia de manutenção.

## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as análises de elementos finitos geradas para o problema identificado na linha de produção, a utilização dessa ferramenta como com enfoque na manutenção preditiva e as alterações e melhorias feitas no projeto levando em consideração os conceitos de engenharia de manutenção.

Serão mostrados os procedimentos de coleta e análise de dados bem como as simplificações e considerações adotados e ainda os resultados obtidos após as análises.

### 4.2 ANÁLISE DO EQUIPAMENTO ATUAL

O equipamento utilizado originalmente e que apresenta falhas repetidas era bastante pobre em relação a informações, o seu desenho, apresentado na figura 1 mostra a falta de detalhes, não são feitas observações em relação ao material utilizado, o modo de fabricação, a estrutura construtiva etc.

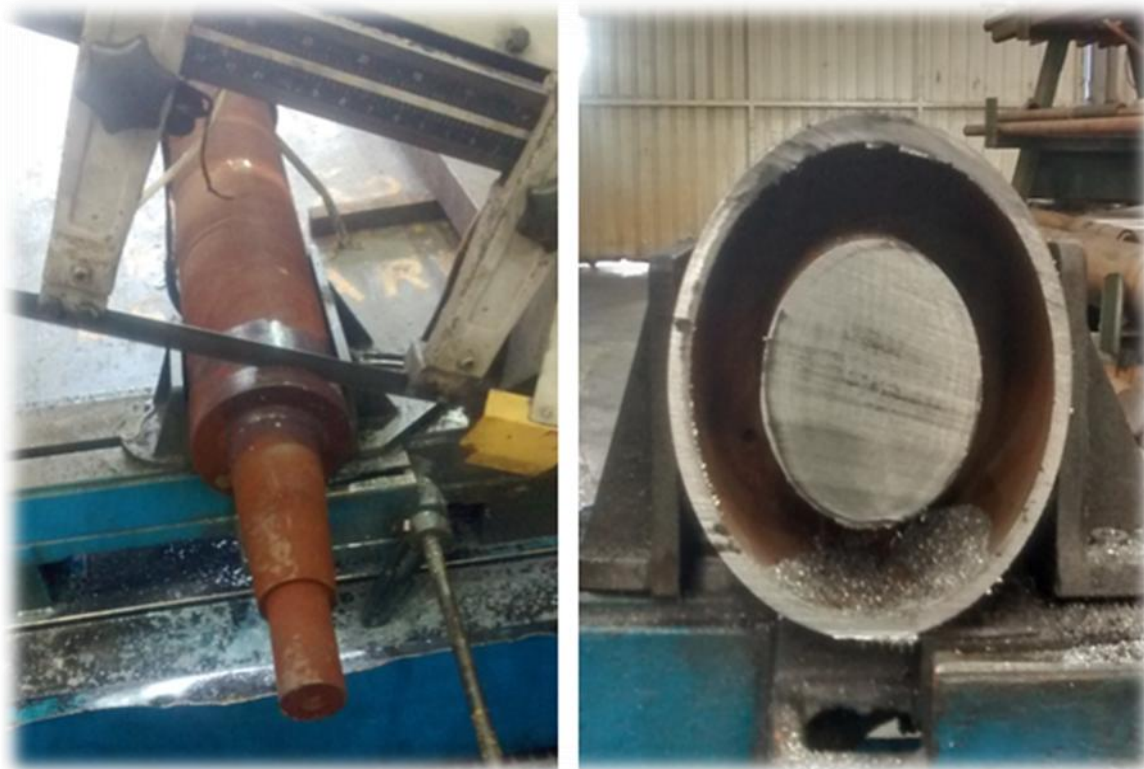
Levando isso em consideração, o primeiro passo foi a consolidação do processo, a investigação sobre o equipamento, para isso foi utilizado um rolo considerado inapto para operação mostrado na figura 36, pois esse já havia apresentado falha no processo.

Figura 36 - Rolo utilizado para as análises



Este rolo foi levado até a oficina de manutenção central da empresa, onde foi cortado (figuras 37).

Figura 37 - Corte do rolo para análise



Fonte: O autor (2018)

Os cortes permitiram entender o método de construção do equipamento, foi possível também estimar as propriedades do material através das medições de dureza feitas com um durômetro (figuras 38).

Figura 38 - Durezas medidas no rolo



Fonte: O autor (2018)

Os valores das medições feitas são apresentados na tabela 4, todas essas medidas tomadas e informações obtidas são relativamente simples de serem feitas, porém o funcionamento do equipamento acontecia sem esses dados desde o início do processo, a aproximadamente 20 anos.

Tabela 4 - Valores de dureza encontrados no rolo através do durômetro

LOCAL DAS MEDIÇÕES	VALOR MEDIDO EM ROCKWELL B
PONTEIRAS	83
TUBO	68,5

Fonte: O autor (2018)

Através das durezas encontradas e utilizando a equação 7 apresentada por Norton (2013) é possível estimar o limite de resistência a tração do material e com isso sugerir qual material vem sendo utilizado no equipamento:

$$S_{ut} \cong 3,45H_B \pm 0,2H_B \text{ MPa (Equação 7)}$$

Onde:

$$S_{ut} = \text{Limite de resistencia a tração}$$

$$H_B = \text{Dureza Brinell}$$

Como as durezas medidas estão em Rockwell B, é preciso utilizar a tabela 5 para a conversão das unidades.

Tabela 5 - Conversão entre unidades de medida de dureza

HB Brinell	HV Vickers	Rockwell	
		HRB	HRC
627	667	–	58,7
578	615	–	56,0
534	569	–	53,5
495	528	–	51,0
461	491	–	48,5
429	455	–	45,7
401	425	–	43,1
375	396	–	40,4
341	360	–	36,6
311	328	–	33,1
277	292	–	28,8
241	253	100	22,8
217	228	96,4	–
197	207	92,8	–
179	188	89,0	–
159	167	83,9	–
143	150	78,6	–
131	137	74,2	–
116	122	67,6	–

Fonte: Norton (2013)

Utilizando então os dados convertidos na tabela 5 na equação 7 são obtidos os valores de resistência a tração para a ponteira e o tubo:

$$S_{ut \text{ Ponteira}} \cong 3,45 \cdot 159 \pm 0,2 \cdot 159 \cong 516,75 - 580,35 \text{ MPa}$$

$$S_{ut \text{ tubo}} \cong 3,45 \cdot 116 \pm 0,2 \cdot 116 \cong 377 - 423,4 \text{ MPa}$$

Aplicando esses valores em uma tabela com informações sobre materiais, é possível encontrar um tipo de material para esses componentes, é importante lembrar que isso é uma estimativa e muitos materiais se aplicariam a essas condições, logo foram adotados os mais usuais para esse tipo de aplicação, a tabela 6 mostra em destaque os materiais adotados para o tubo e as ponteiras, um material aço carbono SAE 1020 laminado a quente para o tubo e aço carbono SAE 1045 laminado a quente para as ponteiras.

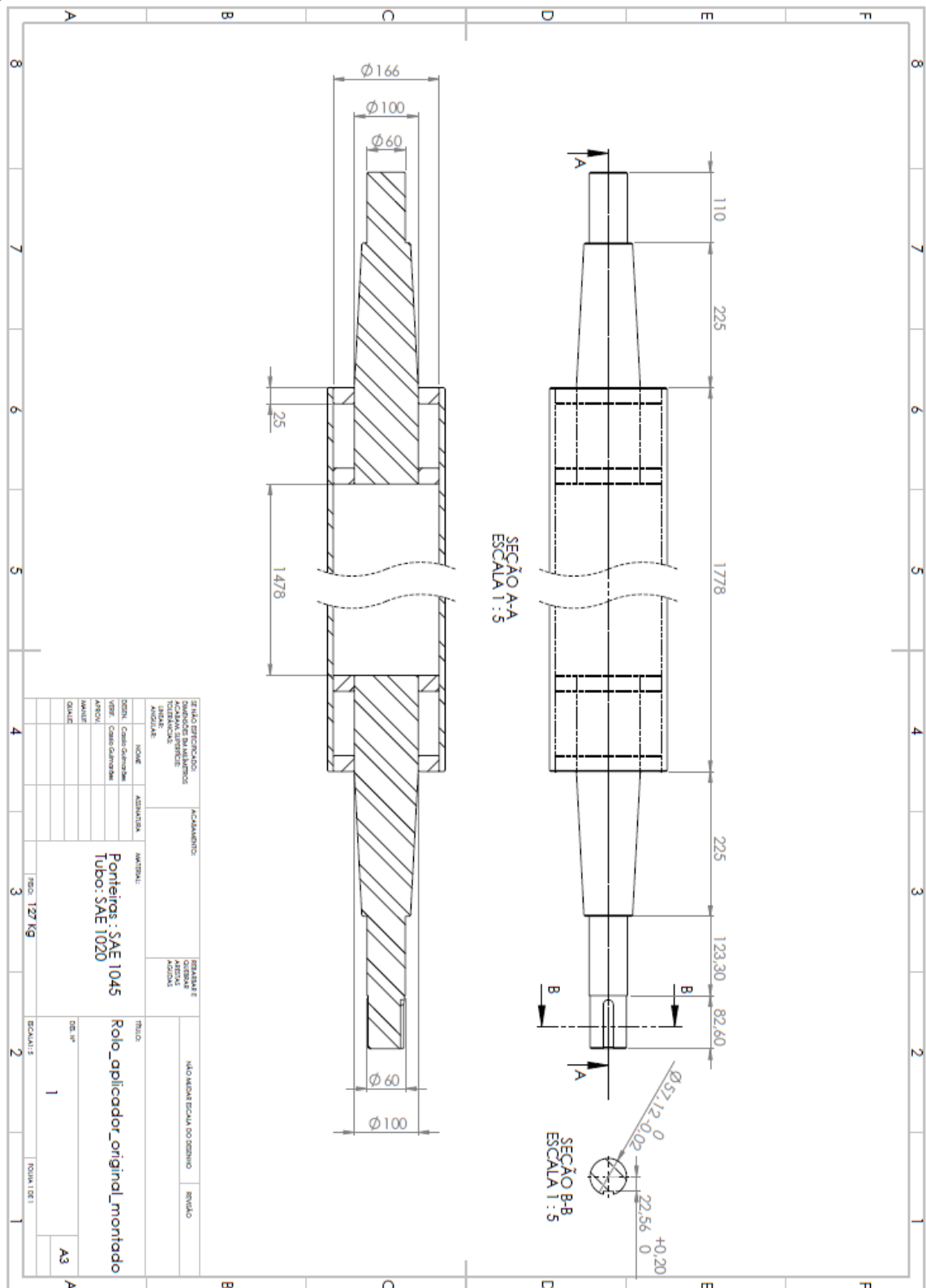
Tabela 6 - Propriedades mecânicas de alguns aços carbono

Número SAE / AISI	Condição	Resistência de escoamento em tração (0,2% de deformação)		Resistência máxima em tração		Elongação do corpo de ensaio de 2 in (%)	Dureza Brinell -HB
		kpsi	MPa	kpsi	MPa		
1010	laminado a quente	26	179	47	324	28	95
	laminado a frio	44	303	53	365	20	105
1020	laminado a quente	30	207	55	379	25	111
	laminado a frio	57	393	68	469	15	131
1030	laminado a quente	38	259	68	469	20	137
	normalizado a 1650°F	50	345	75	517	32	149
	laminado a frio	64	441	76	524	12	149
	temperado e revenido a 1000°F	75	517	97	669	28	255
	temperado e revenido a 800°F	84	579	106	731	23	302
	temperado e revenido a 400°F	94	648	123	848	17	495
1035	laminado a quente	40	276	72	496	18	143
	laminado a frio	67	462	80	552	12	163
1040	laminado a quente	42	290	76	524	18	149
	normalizado a 1650°F	54	372	86	593	28	170
	laminado a frio	71	490	85	586	12	170
	temperado e revenido a 1200°F	63	434	92	634	29	192
	temperado e revenido a 800°F	80	552	110	758	21	241
	temperado e revenido a 400°F	86	593	113	779	19	262
1045	laminado a quente	45	310	82	565	16	163
	laminado a frio	77	531	91	627	12	179
1050	laminado a quente	50	345	90	621	15	179
	normalizado a 1650°F	62	427	108	745	20	217
	laminado a frio	84	579	100	689	10	197
	temperado e revenido a 1200°F	78	538	104	717	28	235
	temperado e revenido a 800°F	115	793	158	1 089	13	444
	temperado e revenido a 400°F	117	807	163	1 124	9	514
1060	laminado a quente	54	372	98	676	12	200
	normalizado a 1650°F	61	421	112	772	18	229
	temperado e revenido a 1200°F	76	524	116	800	23	229
	temperado e revenido a 800°F	97	669	140	965	17	277
	temperado e revenido a 400°F	111	765	156	1 076	14	311

Fonte: Norton (2013)

Com esses dados e as medidas tiradas após o corte dos componentes é possível a criação de um desenho técnico detalhado, esse é apresentado na figura 39.

Figura 39 - Desenho técnico detalhado do rolo aplicador



Fonte: O Autor (2018)

O desenho técnico é primordial para qualquer tipo de aplicação da engenharia de manutenção, a geração de histórico para as análises futuras é um item básico desse tipo de manutenção.



#### 4.2.1 Análise De Elementos Finitos Rolo Aplicador Atual

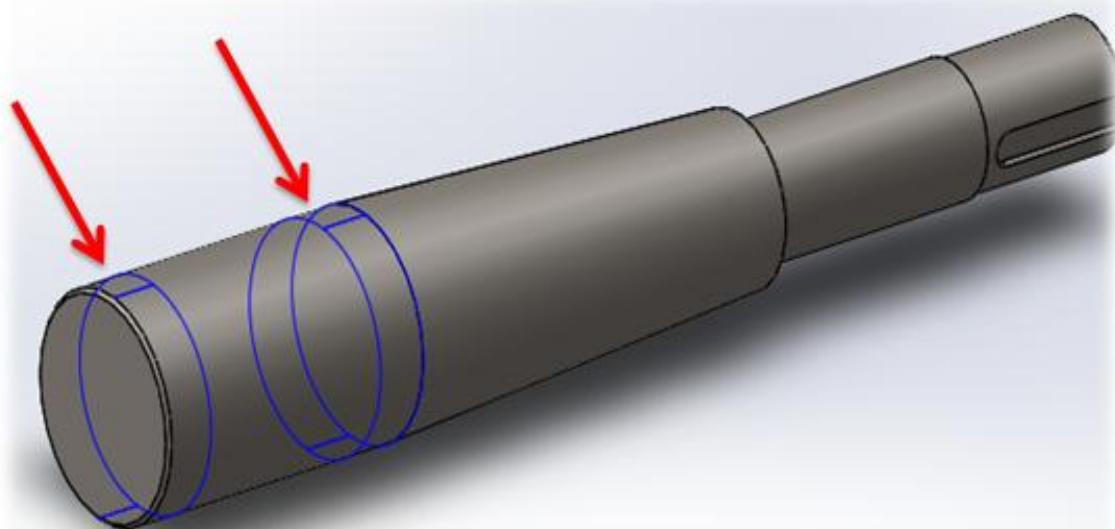
Com os dados de materiais encontrados, a modelagem do rolo e desenho técnico feito, mais os dados das condições de contorno e operação, é possível dar início as análises de elementos finitos que serão mostradas em detalhes nas próximas seções e figuras, essa análise inicial tem por objetivo apresentar os pontos críticos do equipamento, esses pontos também serão o foco para possíveis melhorias.

##### 4.2.1.1 Análise De Elementos Finitos Ponteira

Essa seção apresenta o passo a passo de uma análise de elementos finitos estática e de fadiga, bem como os resultados, para as próximas seções esses passos se repetem e não serão apresentados no trabalho evitando elementos repetitivos.

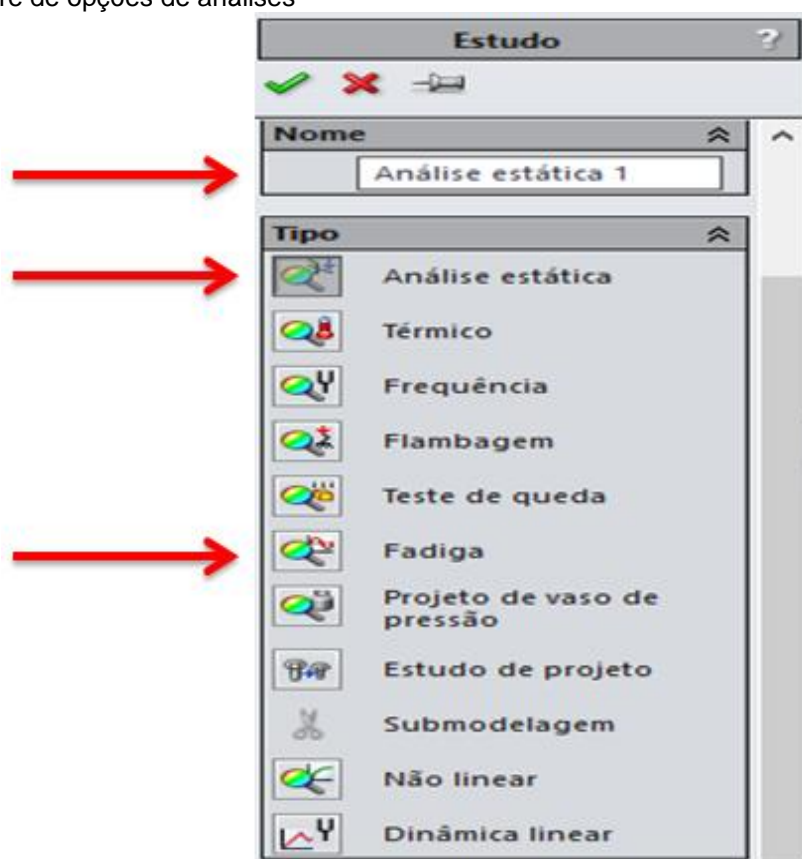
A primeira parte da análise consiste na criação da superfície onde é aplicada a força, trata-se de superfície de contato entre a ponteira e os espelhos nos quais ela é soldada, a ponteira se comporta como se toda a força fosse aplicada nessa região, inicialmente pode-se ver que essa área de contato é pequena, a região criada é apresentada na figura 40.

Figura 40 - Superfícies de aplicação de força criadas



A segunda parte é a abertura de um novo estudo, esse leva o nome de análise estática 1, a árvore de opções de estudos é mostrada na figura 41.

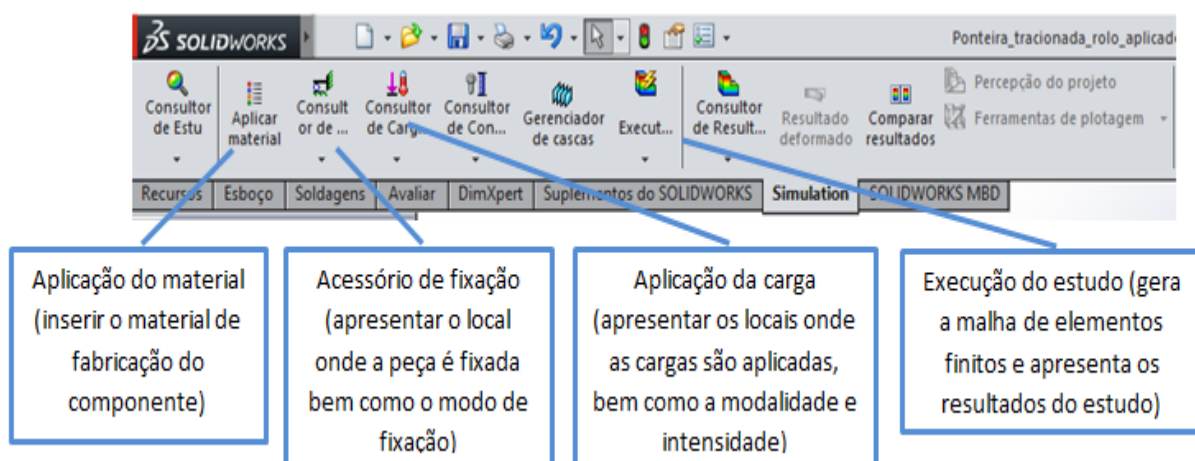
Figura 41 - Arvore de opções de análises



Fonte: O Autor (2018)

O estudo de análise estática apresenta uma barra de ferramentas com uma série de informações que precisam ser informadas para que a análise rode, essa barra de ferramentas é mostrada na figura 42.

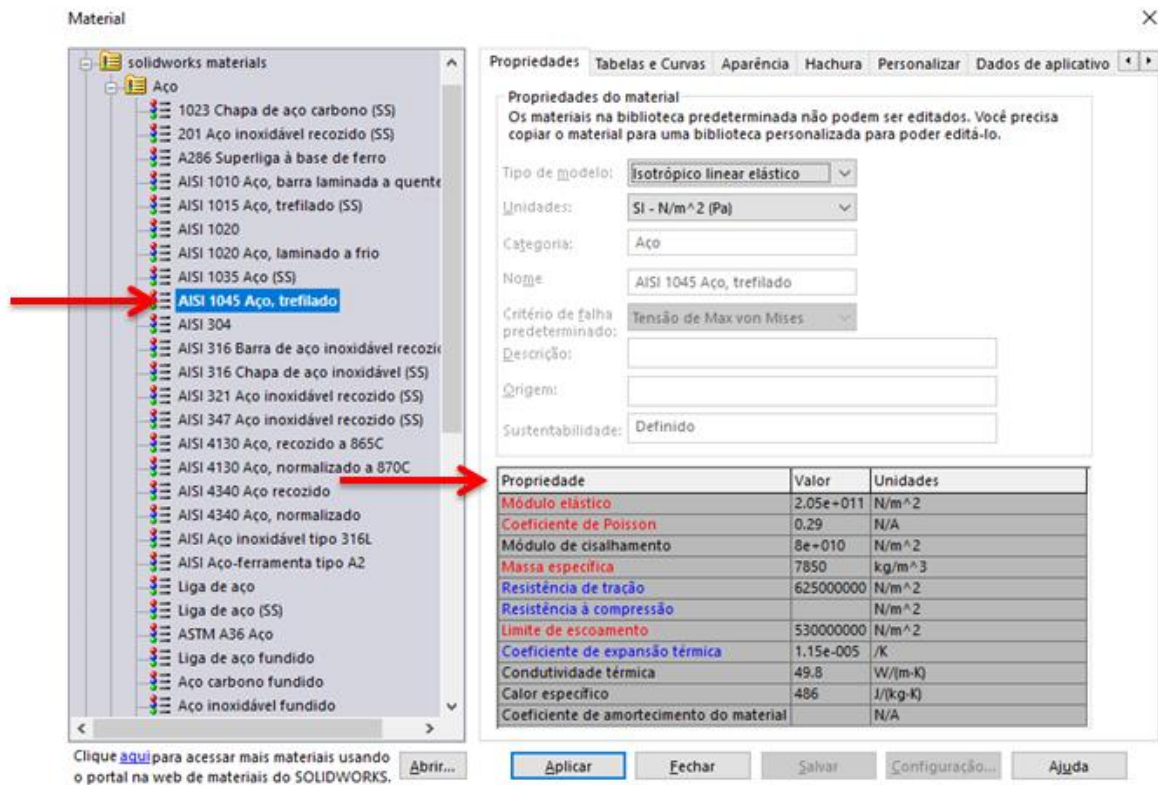
Figura 42 - Barra de ferramentas da análise estática



Fonte: O Autor (2018)

Dentro do item aplicar material é possível escolher em uma vasta biblioteca de matérias do software o SAE 1045, do qual são fabricadas as ponteiras, as propriedades desse material são demonstradas na tela, isso pode ser visto na figura 43. A escolha correta do material é fundamental, pois suas propriedades determinam a vida e a falha do componente.

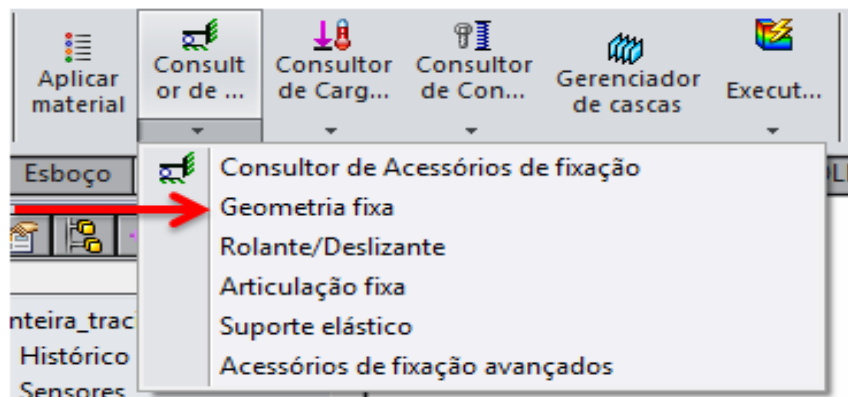
Figura 43 - Aplicação do material



Fonte: O Autor (2018)

No próximo item deve ser feita a escolha do modo de fixação, para esse caso é escolhido o modo Geometria Fixa, conforme demonstra a figura 44.

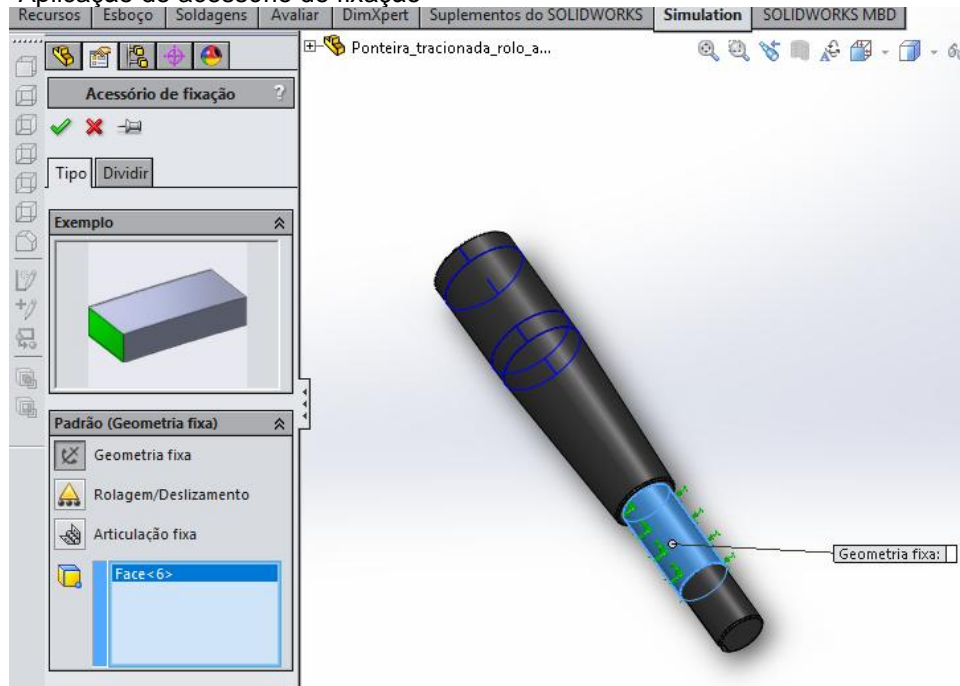
Figura 44 - Opções de fixação



Fonte: O Autor (2018)

Com a aba de geometria fixa aberta pode ser selecionada a superfície onde existe a restrição, no caso das ponteiros é selecionada a superfície onde é montado o mancal de rolamentos, o mancal restringe os movimentos do eixo em relação a carga aplicada, essa aplicação é mostrada na figura 45.

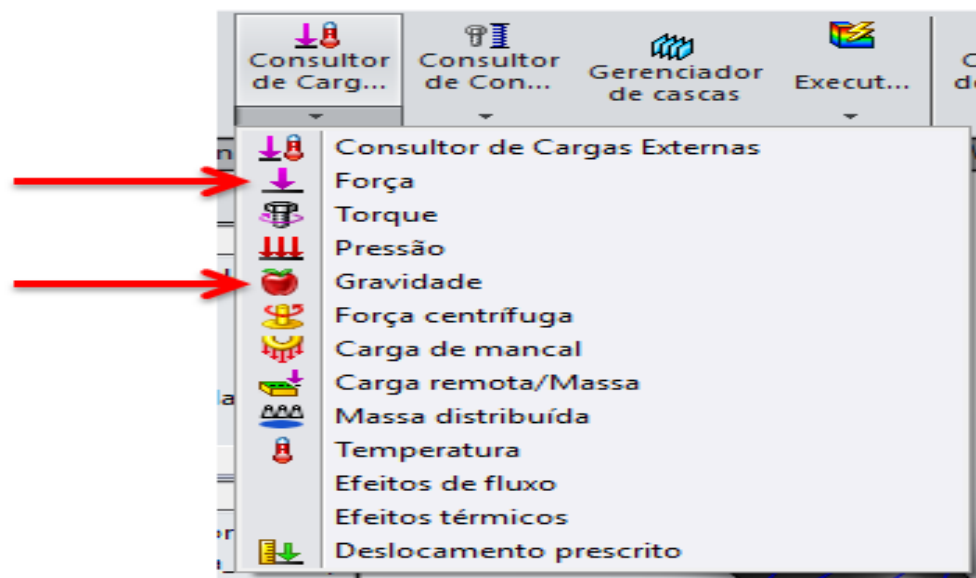
Figura 45 - Aplicação de acessório de fixação



Fonte: O Autor (2018)

No item aplicação de cargas são escolhidos os modos força e gravidade conforme apresentados na figura 46.

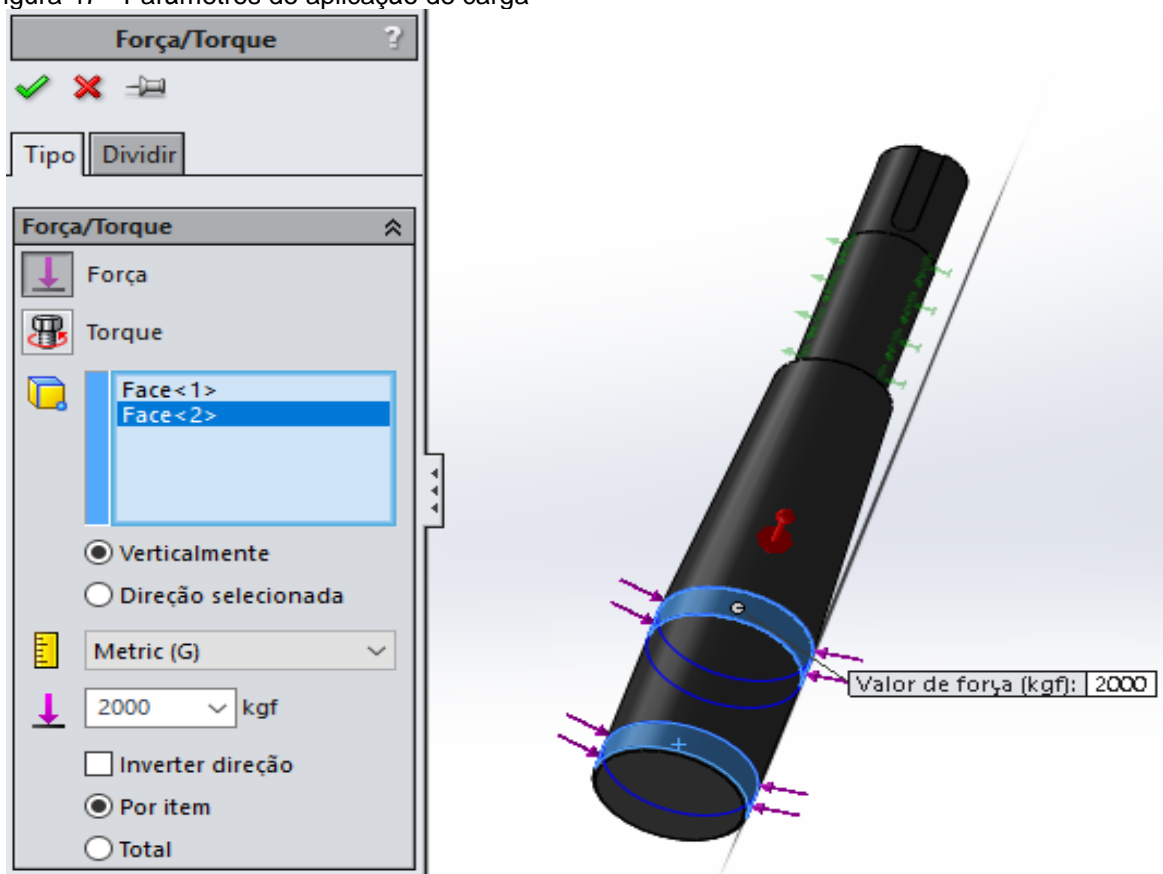
Figura 46 - Opções para aplicação de cargas



Fonte: O Autor (2018)

Na figura 47 podem ser vistos os parâmetros da aplicação da carga, são selecionadas as superfícies criadas previamente, bem como é lançado o valor de carga de 2000 KGF.

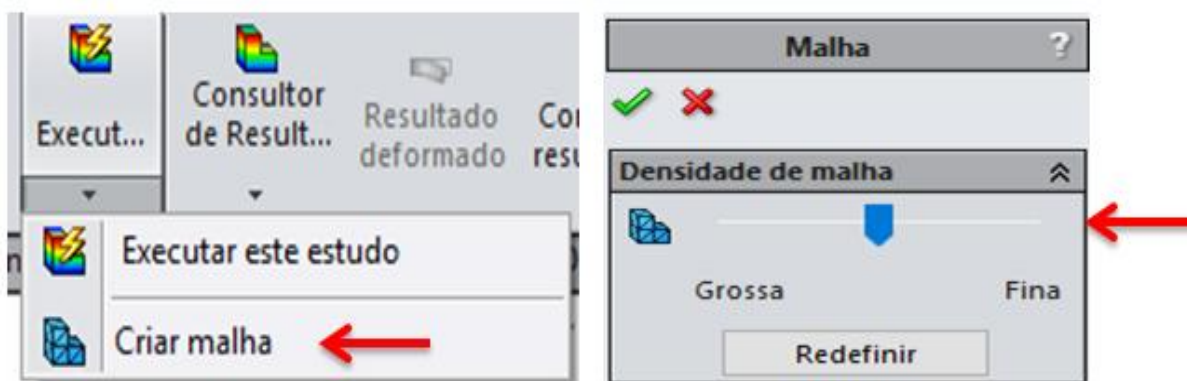
Figura 47 - Parâmetros de aplicação de carga



Fonte: O Autor (2018)

O próximo item apresenta as configurações para criação da malha de elementos finitos, nesse item pode ser escolhida uma malha mais refinada ou grosseira de acordo com o estudo, essa configuração é apresentada na figura 48.

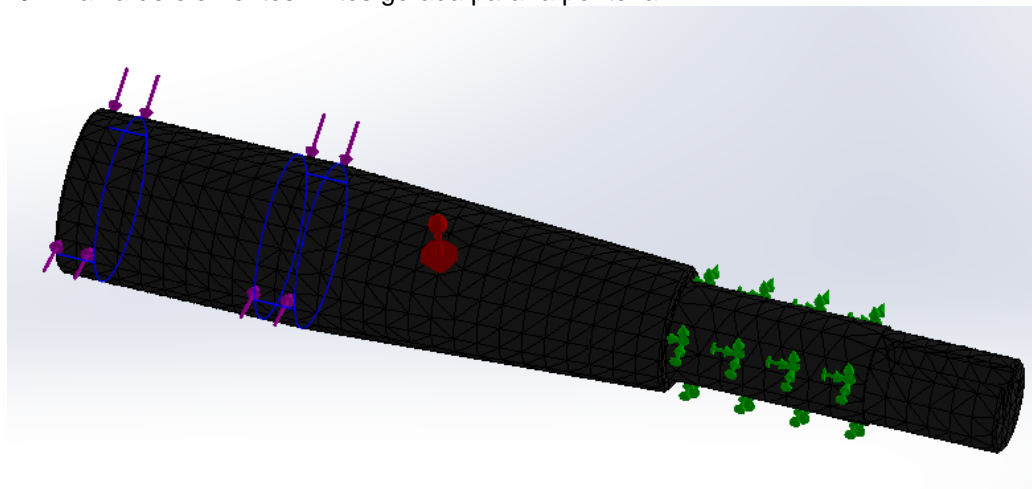
Figura 48 - Configurações de malha



Fonte: O Autor (2018)

Na figura 49 pode ser visto a ponteira com a malha de elementos finitos geradas.

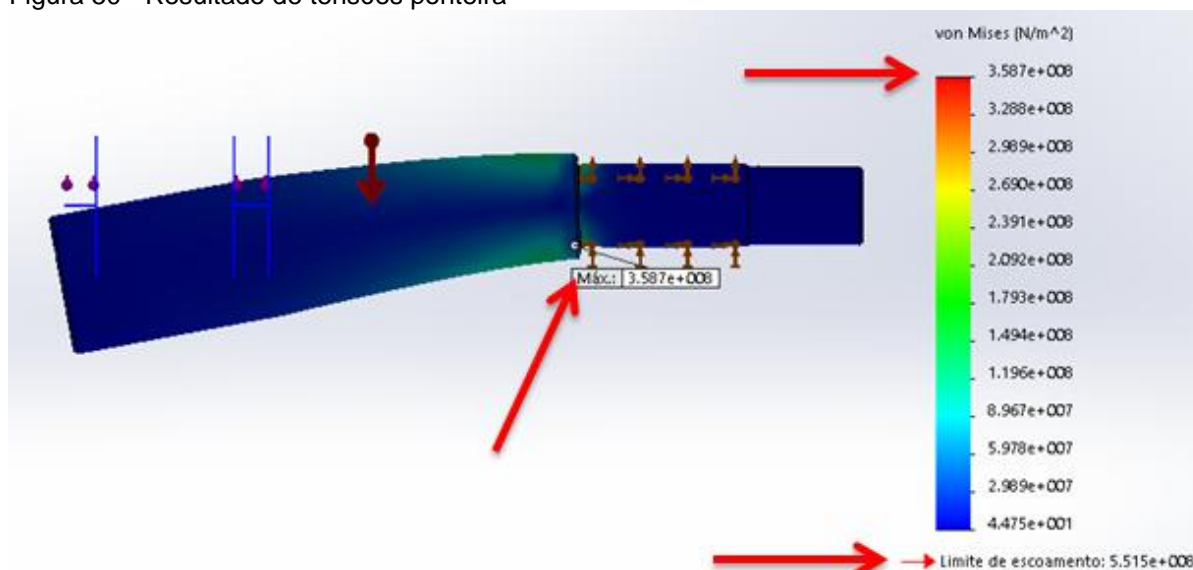
Figura 49 - Malha de elementos finitos gerada para a ponteira



Fonte: O Autor (2018)

Com a malha gerada pode ser executado o estudo, o estudo apresenta 3 importantes resultados, a tensão a qual o eixo está submetido, o deslocamento em milímetros do componente e o fator de segurança, todos esses itens são fundamentais para o projeto, a tela de resultados apresenta de maneira gráfica e didática os pontos de deformação, e a escala mostra numericamente os resultados críticos, a figura 50 mostra o resultado da análise em relação as tensões de von mises presentes no eixo, pode ser visto que a tensão submetida se encontra abaixo da tensão de escoamento do material, portanto é aceitável para o projeto e não vai falhar nos primeiros ciclos.

Figura 50 - Resultado de tensões ponteira

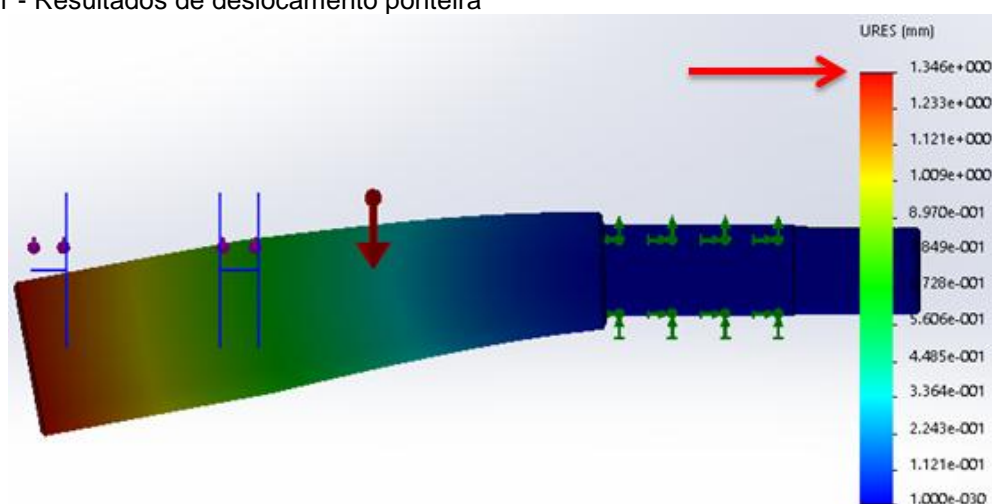


Fonte: O Autor (2018)

É possível observar na figura 50 o ponto onde a tensão de von mises é máxima, esse ponto se trata de uma troca de seções, uma alteração de diâmetros repentina, isso é considerado em projetos mecânicos como um concentrador de tensões, esse ponto vai ser levado em consideração no momento das alterações de projetos.

Outro fator importante no projeto é o deslocamento do componente, apesar da ponteira na sofrer o rompimento nos primeiros ciclos, ele apresenta um deslocamento elevado de 1,346 mm como pode ser visto no resultado mostrado na figura 51.

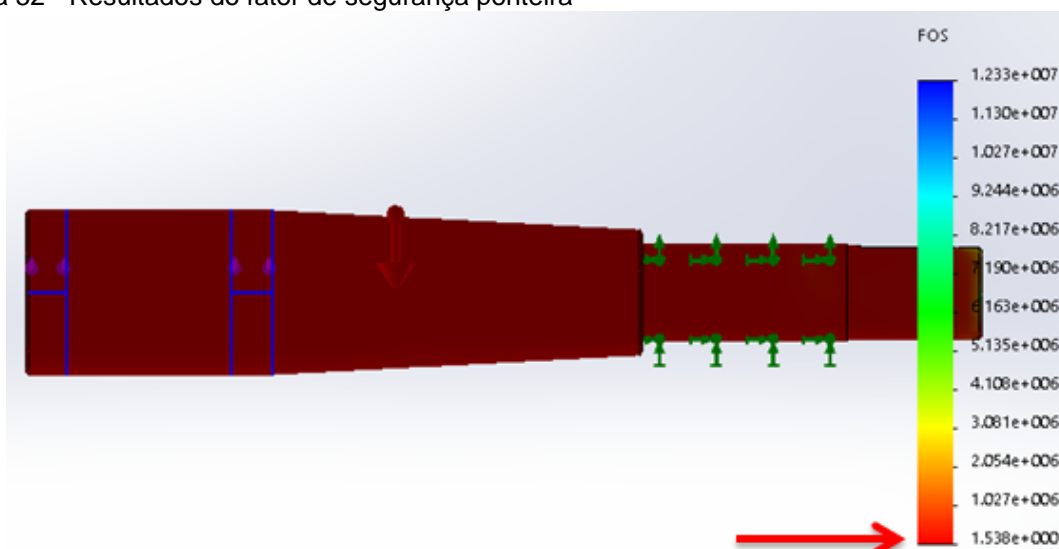
Figura 51 - Resultados de deslocamento ponteira



Fonte: O Autor (2018)

Por fim é apresentado o coeficiente de segurança na figura 52, o FS de 1,538 pode ser considerado baixo em relação a importância da aplicação do componente.

Figura 52 - Resultados do fator de segurança ponteira

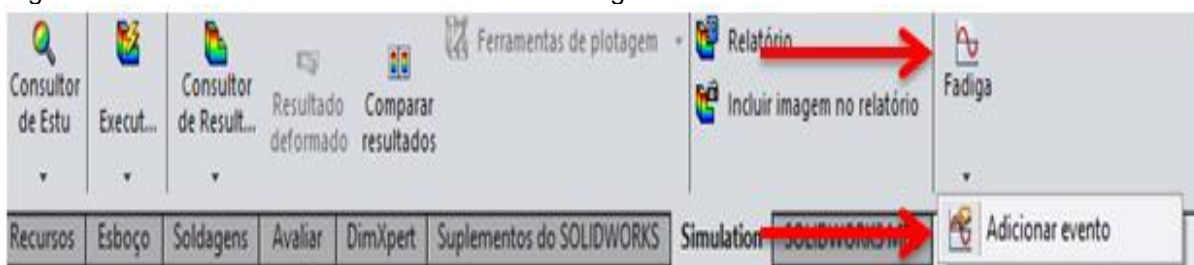


Fonte: O Autor (2018)

A análise estática foi concluída, ela é um pré requisito para a análise de fadiga, o início da análise em fadiga se dá na árvore de opções de estudo apresentado na figura 41, fazendo dessa vez a opção pelo estudo de fadiga e nomeando como fadiga 1.

Com o estudo de fadiga aberto é possível observar a barra de ferramentas de fadiga, ele é similar ao de análise estática, o item mais relevante é destacado na figura 53, trata-se do item fadiga e adicionar evento, onde é adicionado um evento ou aplicação de carga que irá se repetir por um dado número de ciclos constantes, no caso desse estudo será utilizada a análise estática gerada aqui neste trabalho.

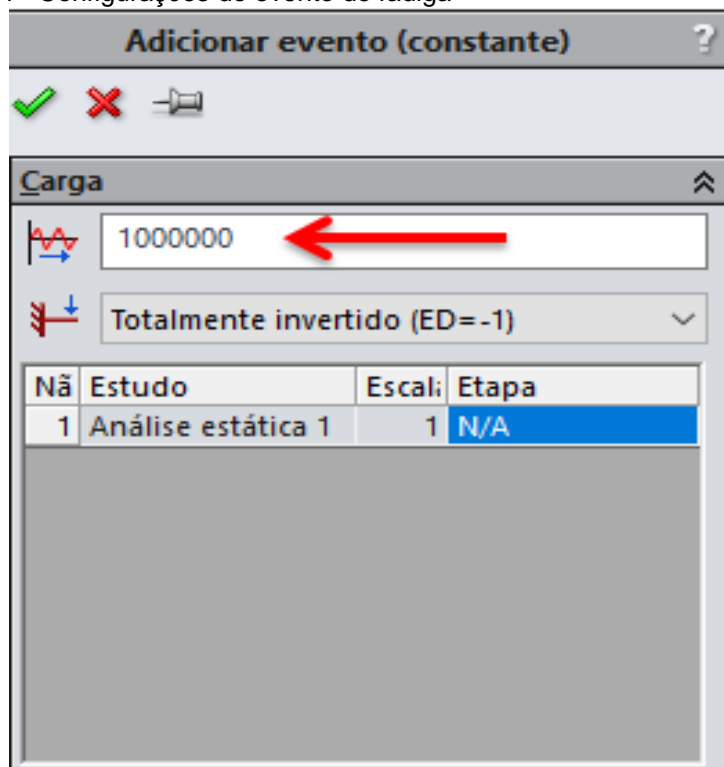
Figura 53 - Barra de ferramentas da análise de fadiga



Fonte: O Autor (2018)

Na figura 54 são mostradas as configurações para a aplicação dos ciclos, para a análise foram escolhidos 1E6 ciclos.

Figura 54 - Configurações do evento de fadiga

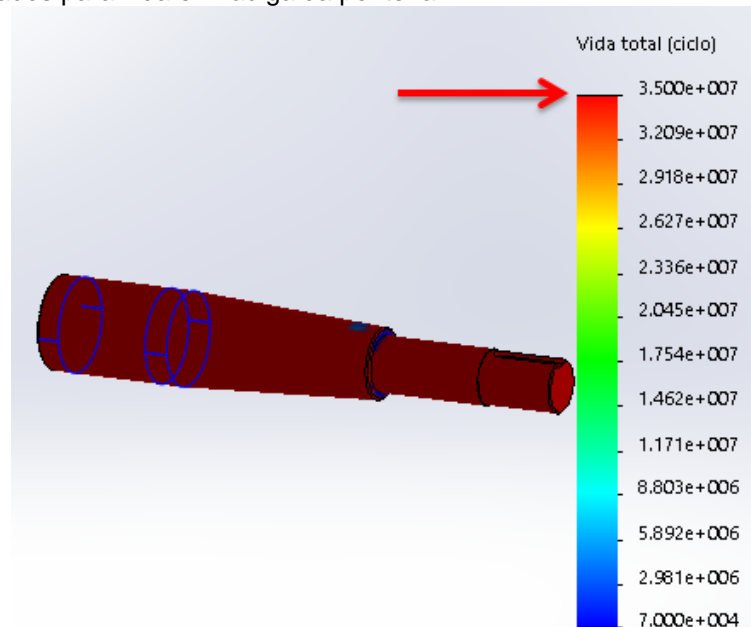


Fonte: O Autor (2018)



Com o evento de fadiga configurado é possível executar o estudo, como resultado é apresentado o número de ciclos que o componente irá executar até sua falha, esse resultado é mostrado na figura 55.

Figura 55 - Resultados para vida em fadiga da ponteira



Fonte: O Autor (2018)

Com esses dados gerados pela a análise e dados conhecidos do motor e redutor do equipamento é possível estimar a vida do componente. O equipamento é movido por um motor com rotação  $\omega$  de 1750 RPM que por sua vez é acoplado em um redutor com fator  $i$  de 7,27, as equações a seguir demonstram o ciclo de vida do componente:

$$\omega_{Saída} = \frac{\omega_{Entrada}}{i} = \frac{1750}{7,27} = 240 \text{ RPM (Equação 8)}$$

A ponteira assim como o tubo, está submetida a uma rotação de 240 RPM, a conversão para Ciclos por dia é apresentada a seguir:

$$\frac{240 \text{ ciclos}}{\text{minuto}} \times \frac{60 \text{ minutos}}{\text{hora}} \times \frac{24 \text{ horas}}{\text{dia}} = \frac{345600 \text{ ciclos}}{\text{dia}}$$

Por fim a vida do componente é encontrada dividindo o número de ciclos que o componente suporta pelo número de ciclos diários submetidos a ponteira:

$$\text{vida do componente} = \frac{3.5E7 \text{ ciclos}}{\frac{345600 \text{ ciclos}}{\text{dia}}} = 101 \text{ dias (Equação 9)}$$

Nas condições apresentadas a ponteira tende a ter uma vida de 101 dias, qualquer falha antes desse período não deve ser tratada como uma falha de fadiga, e as tomadas de decisão devem levar isso em consideração, a partir de 101 dias de

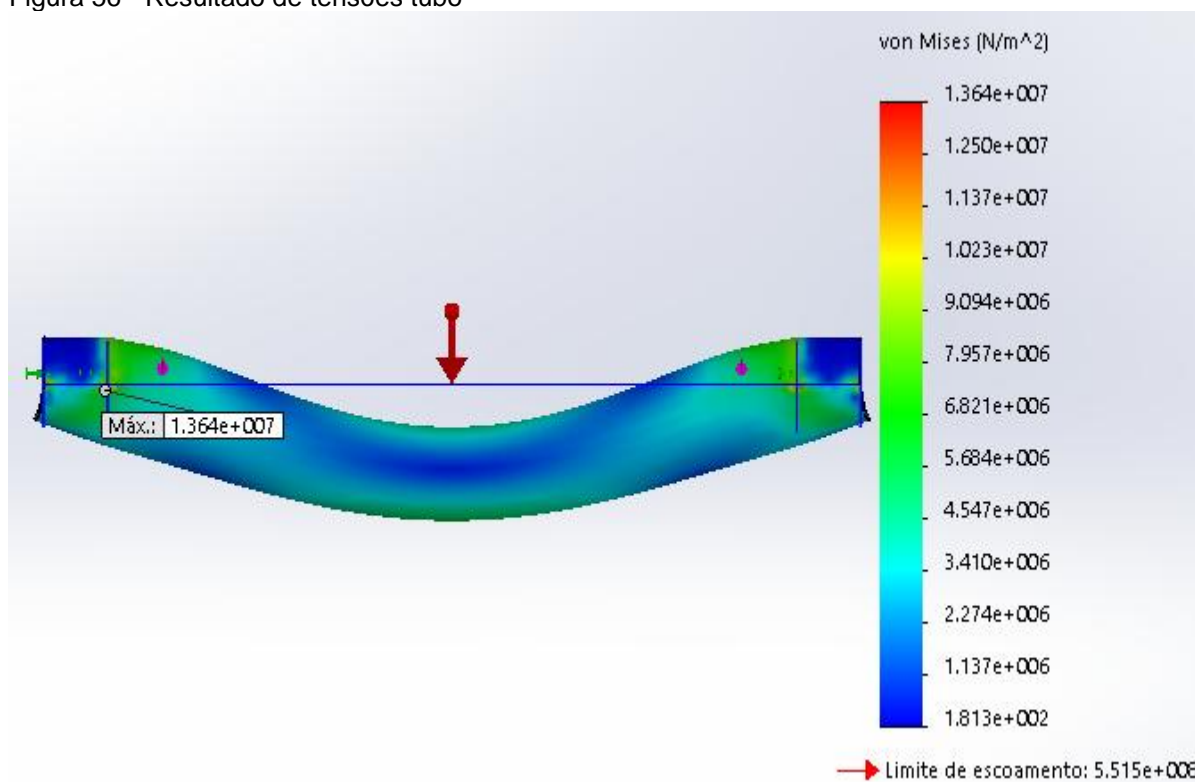
vida esse componente passa a funcionar em uma fase de sobrevivência de projeto e isso não é aconselhável, as paradas de manutenção bem como a aquisição de sobressalentes e o gerenciamento de estoque podem levar em consideração esses dados como norte para suas respectivas gestões.

Com os resultados apresentados a análise é considerada terminada, esses valores agora servem de referência na aplicação dos conceitos de engenharia de manutenção visando as melhorias na operação do componente, a próxima seção apresenta esses mesmos passos da análise apresentados, mas dessa vez para o tubo principal, diante disso serão apresentados apenas os resultados, quaisquer outras mudanças nos parâmetros serão citadas no texto.

#### 4.2.1.2 Análises De Elementos Finitos Tubo

Para a análise do tubo é utilizado um material SAE 1020 conforme encontrado na seção 4.2, todos os passos da seção 4.2.1.1 são seguidos e os resultados são gerados, na figura 56 pode ser visto os resultados para a análise de tensão de von mises.

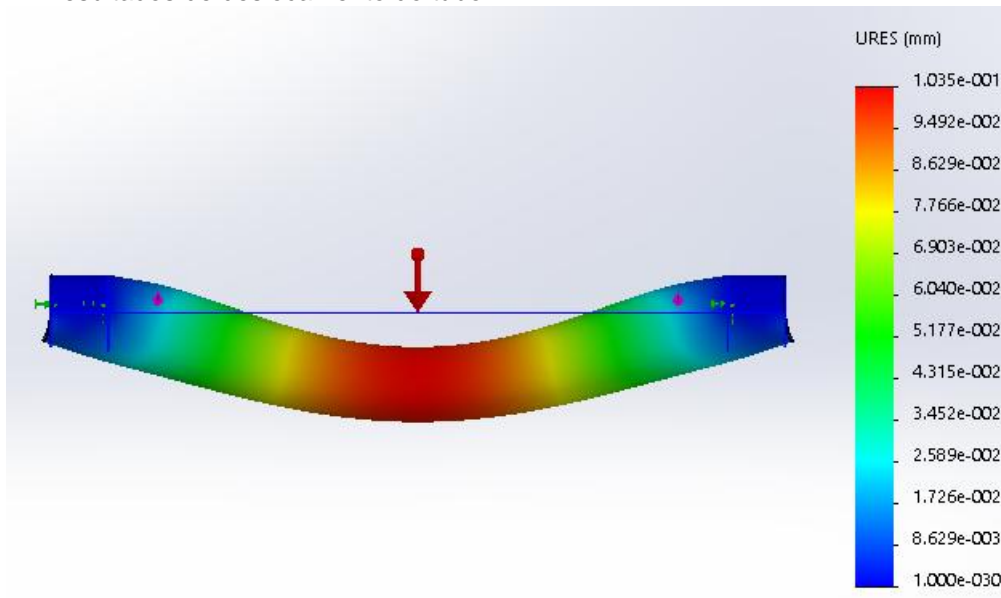
Figura 56 - Resultado de tensões tubo



Fonte: O Autor (2018)

Pode ser visto na figura 56 que a tensão alcançada é inferior ao limite de escoamento, logo o componente é capaz de suportar, na figura 57 é mostrado o resultado para o deslocamento do tubo.

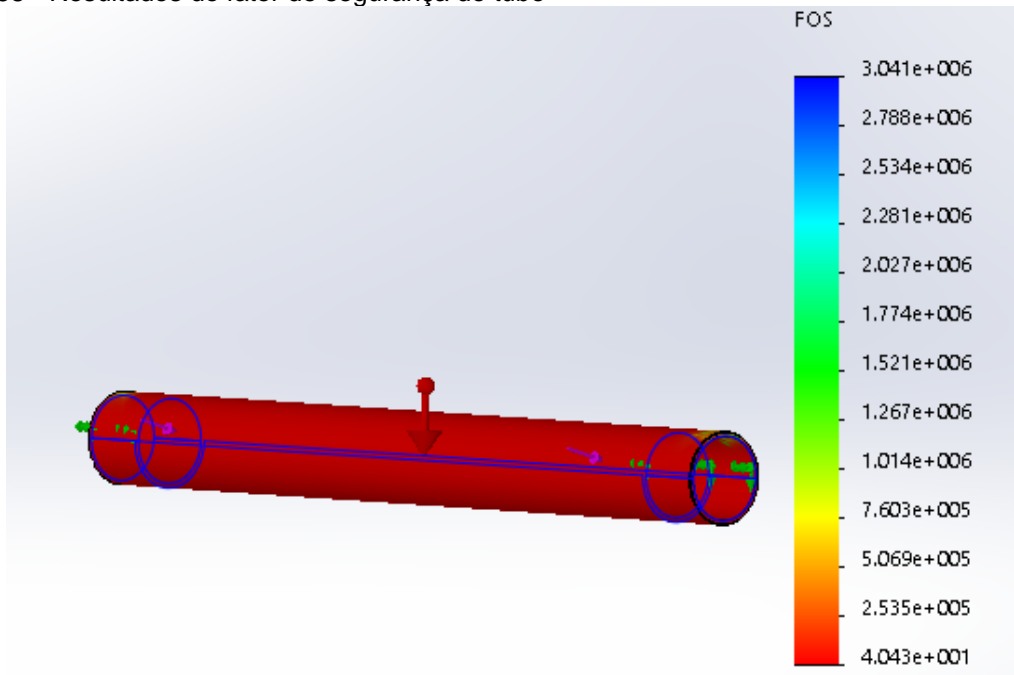
Figura 57 - Resultados de deslocamento do tubo



Fonte: O Autor (2018)

O deslocamento exercido pelo componente é bem baixo, aproximadamente 0,1 mm, bem mais aceitável do que o deslocamento da ponteira, na figura 58 são apresentados os resultados para coeficiente de segurança.

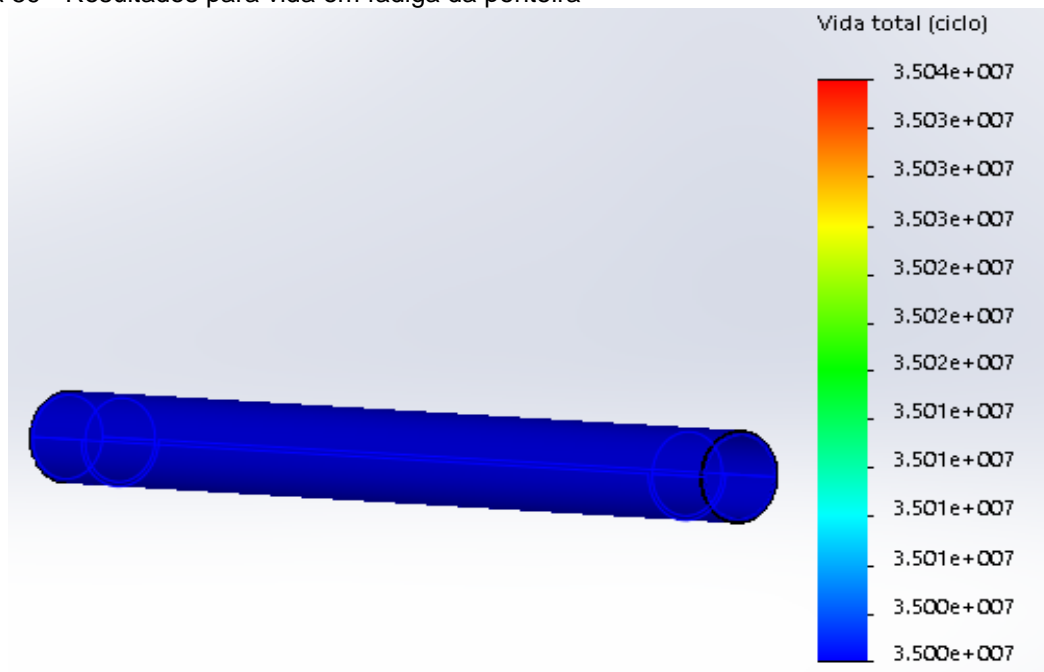
Figura 58 - Resultados do fator de segurança do tubo



Fonte: O Autor (2018)

Um coeficiente de segurança de aproximadamente 40 foi estabelecido, a última parte são os resultados de fadiga, esses são mostrados na figura 59 e mostram que a vida em fadiga do tubo é igual a vida da ponteira.

Figura 59 - Resultados para vida em fadiga da ponteira



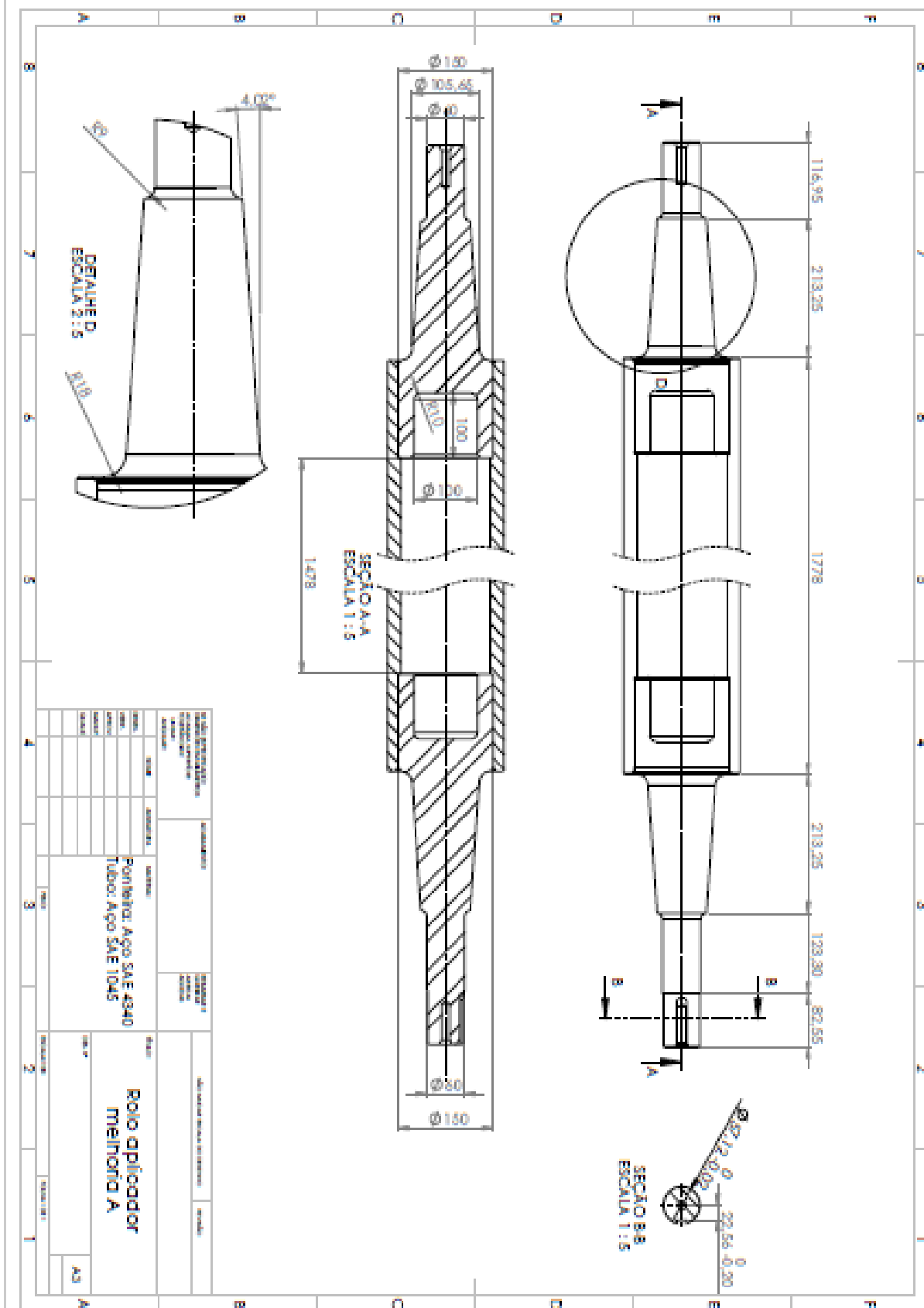
Fonte: O Autor (2018)

Essas análises mostraram que o elemento crítico do conjunto é a ponteira, e os esforços de engenharia de manutenção devem ser voltadas a ela, as próximas seções irão apresentar duas propostas de melhorias no projeto, tratam-se de mudanças simples baseadas em fundamentos de resistência de materiais e elementos de máquinas.

#### 4.3 PROPOSTA DE MELHORIA A

As propostas de melhorias aqui apresentadas visam principalmente fazer mudanças com intuito de diminuir os concentradores de tensão, o projeto original apresenta mudanças de seção transversal muito repentinas, a colocação de raios nessas mudanças podem ajudar, esse processo recebe o nome de adoçamento do projeto, outro fator importante é a eliminação de espelhos soldados, nessa proposta a ponteira é totalmente fixada ao tubo, aumentando a área de contato e aplicação da força e dessa maneira suavizando a tensão gerada, o desenho técnico da melhoria A é apresentado na figura 60.

Figura 60 - Desenho técnico com alterações baseadas em concentradores de tensão



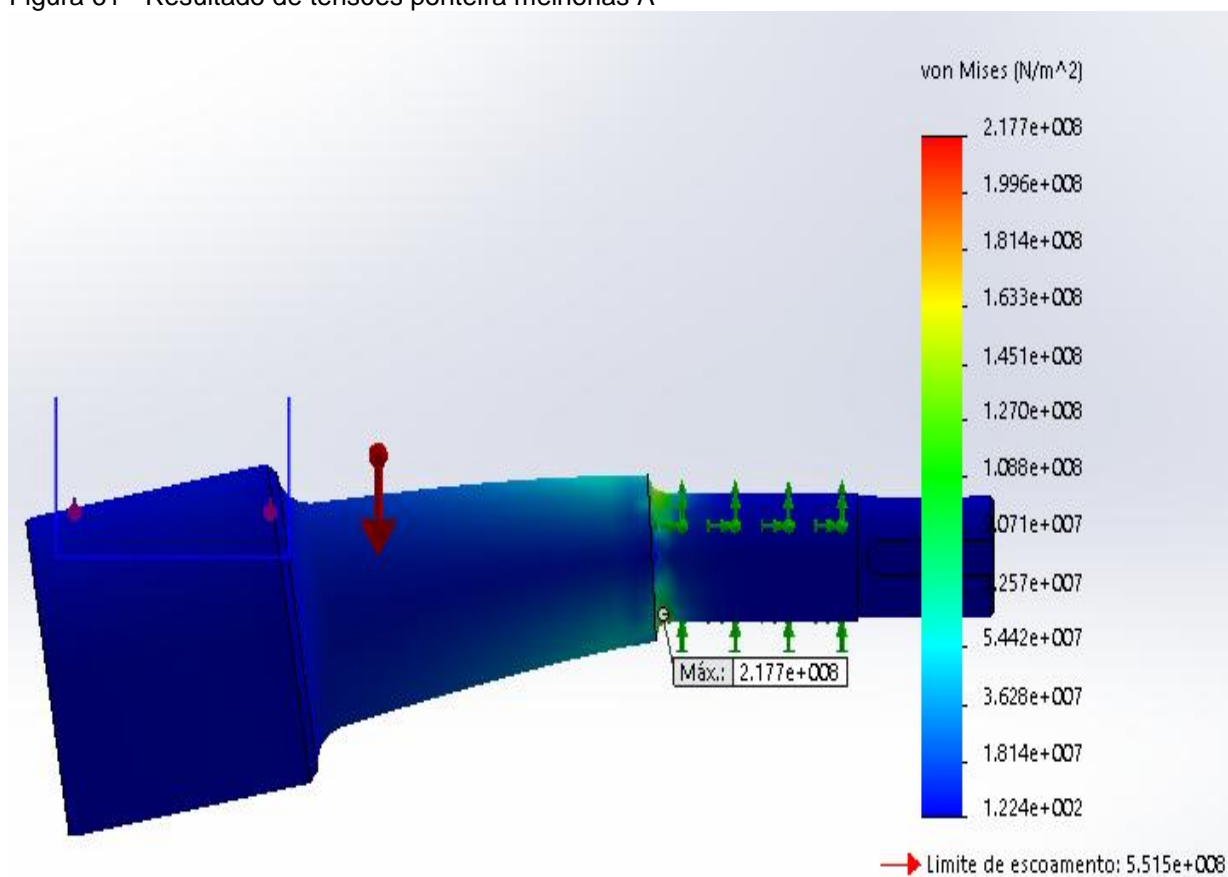
Fonte: O Autor (2018)

Na figura 60 podem ser vistas as alterações relacionadas a adoçamento dos concentradores de tensão no detalhe D, outra mudança é a alteração do material de fabricação do tubo e ponteiros, com o elemento modelado podem ser geradas as análises de elementos finitos.

#### 4.3.1 Análise De Elementos Finitos Ponteira Melhoria A

Com a alteração do material de fabricação, alteração de diâmetro da ponteira, alteração de área de contato da ponteira e os raios de adoçamento aumentados são geradas as novas análises, a análise estática para a tensão de von mises é apresentada na figura 61.

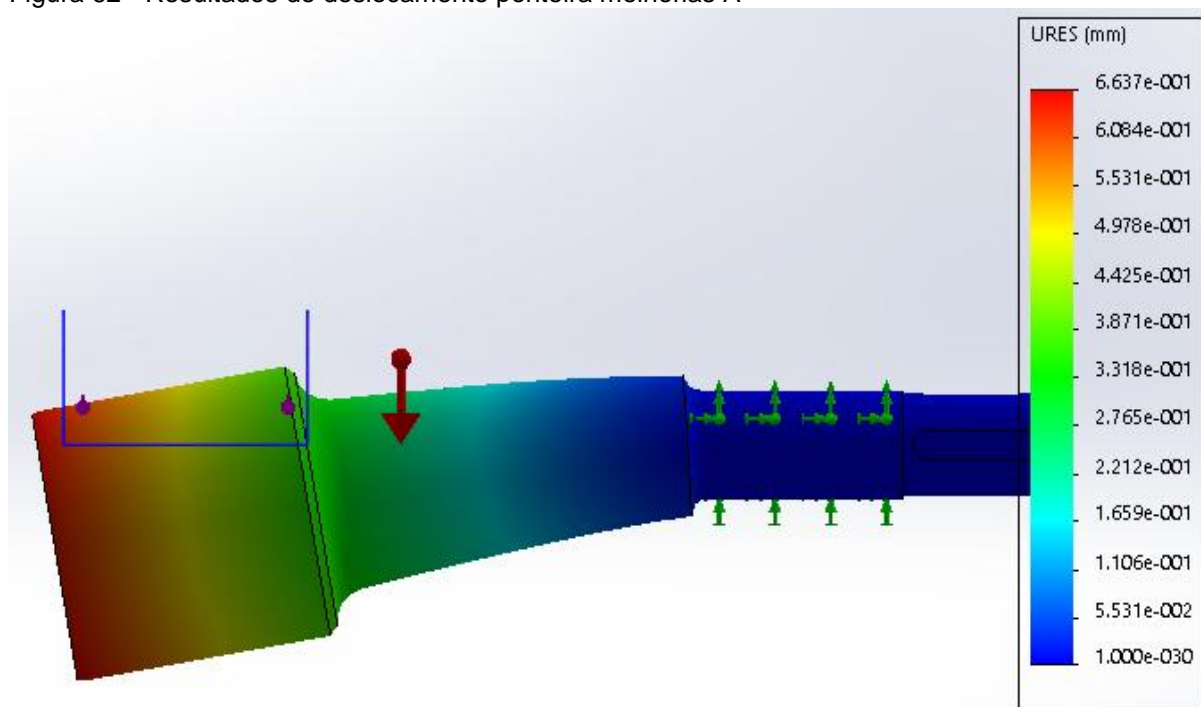
Figura 61 - Resultado de tensões ponteira melhorias A



Fonte: O Autor (2018)

De maneira similar é gerado o resultado para deslocamento, esse é apresentado na figura 62.

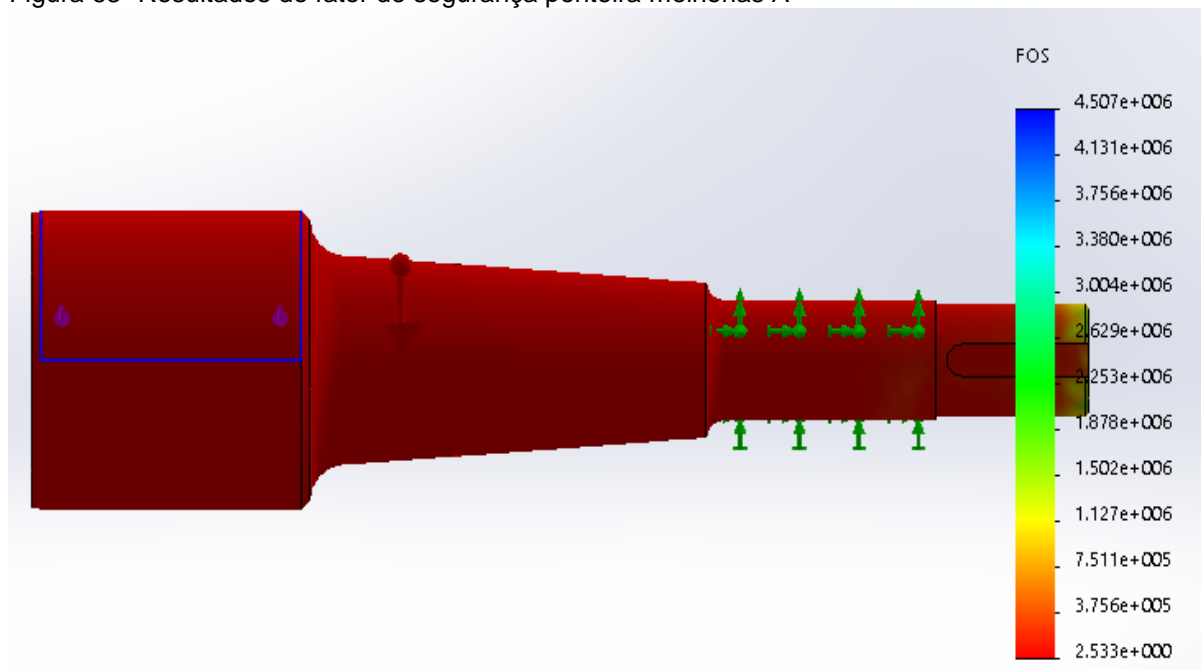
Figura 62 - Resultados de deslocamento ponteira melhorias A



Fonte: O Autor (2018)

É visível a melhora em relação ao deslocamento da ponteira original, as comparações entre as análises serão apresentadas no capítulo 5, o resultado apresentado na figura 63 é o coeficiente de segurança.

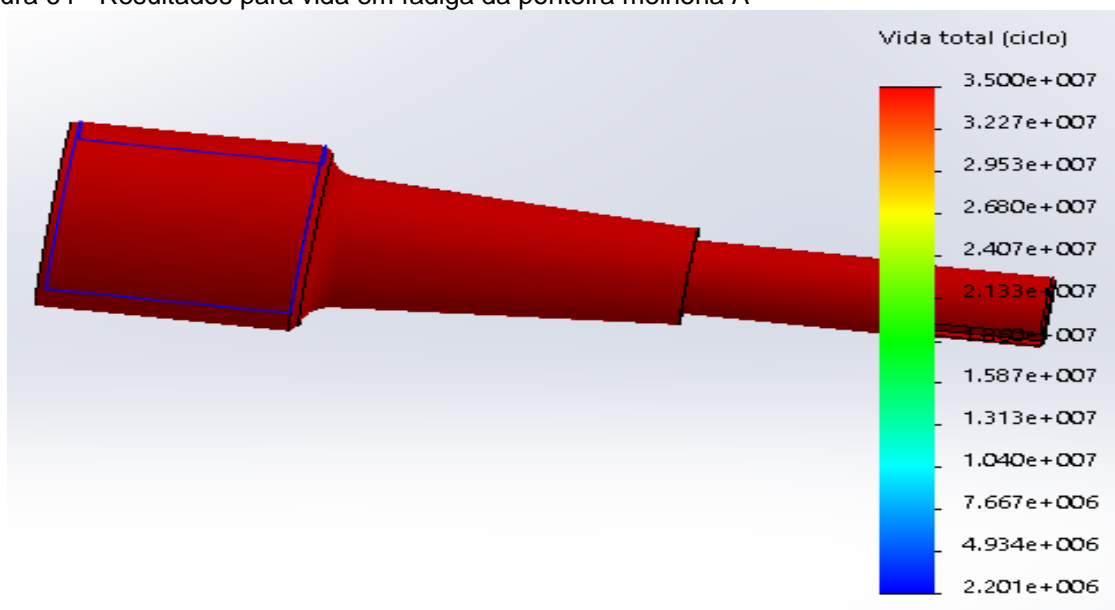
Figura 63 -Resultados do fator de segurança ponteira melhorias A



Fonte: O Autor (2018)

A última análise gerada é relacionada a fadiga, o resultado é mostrado na figura 64.

Figura 64 - Resultados para vida em fadiga da ponteira melhoria A



Fonte: O Autor (2018)

Com os resultados gerados nessa seção é possível uma comparação com dados da primeira análise, essa comparação pode influenciar na tomada de decisão da utilização de um ou outro modelo.

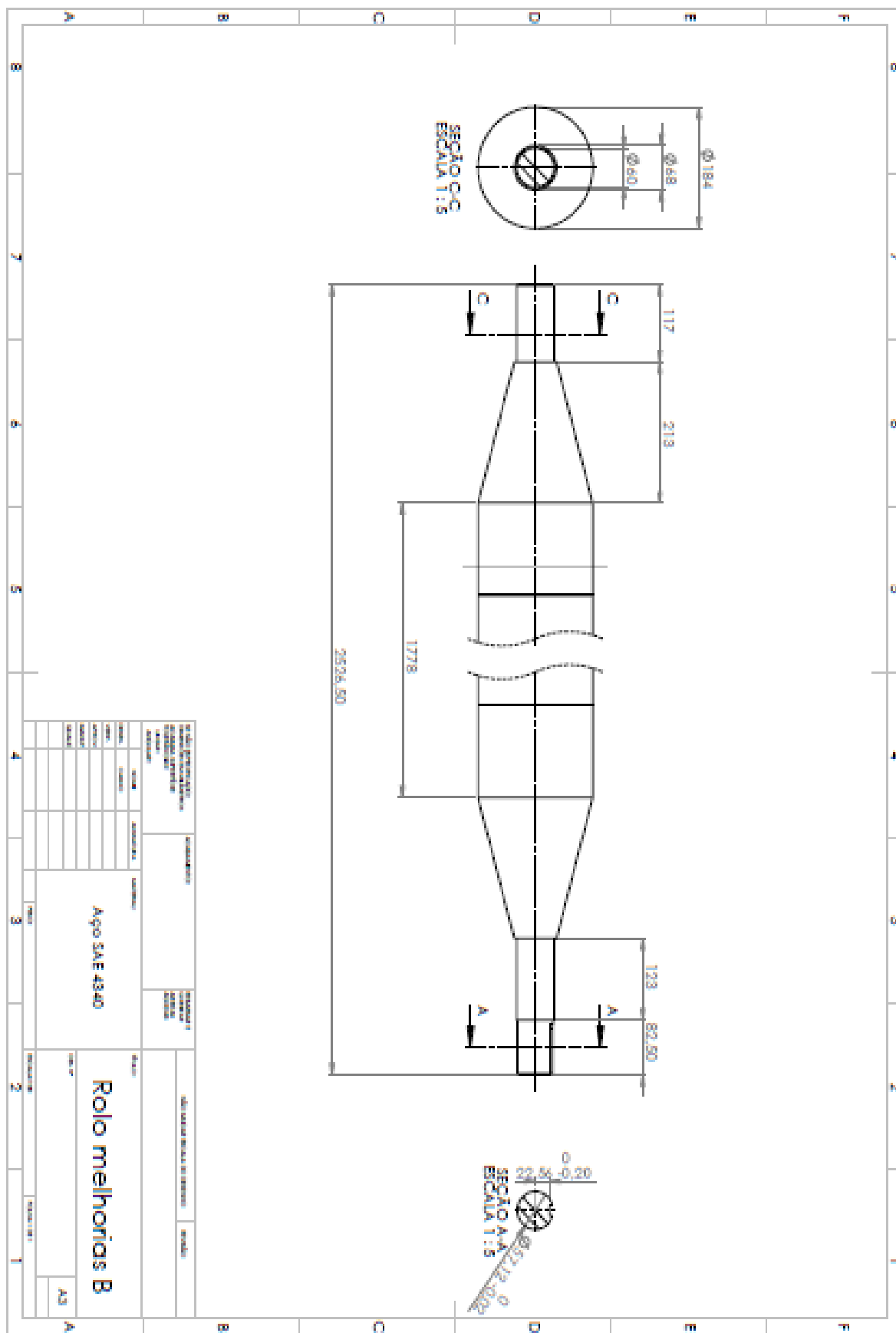
#### 4.4 PROPOSTA DE MELHORIA B

Uma segunda proposta de melhoria é criada levando em consideração alguns fatores de fabricação, a usinagem das ponteiras em separado exige um ajuste de alta complexidade entre as ponteiras e o tubo principal, exige mão de obra de solda, também de alta responsabilidade e ainda sofre com a necessidade de balanceamento.

Na proposta de melhoria B é sugerida a fabricação do rolo de maneira maciça, em um único componente, isso elimina custos de usinagem e solda, e ainda garante um balanceamento mais preciso do componente, além da diminuição do tempo para fabricação, um desenho técnico foi gerado com essas mudanças e esse é apresentado na figura 65.



Figura 65 - Desenho técnico do rolo maciço



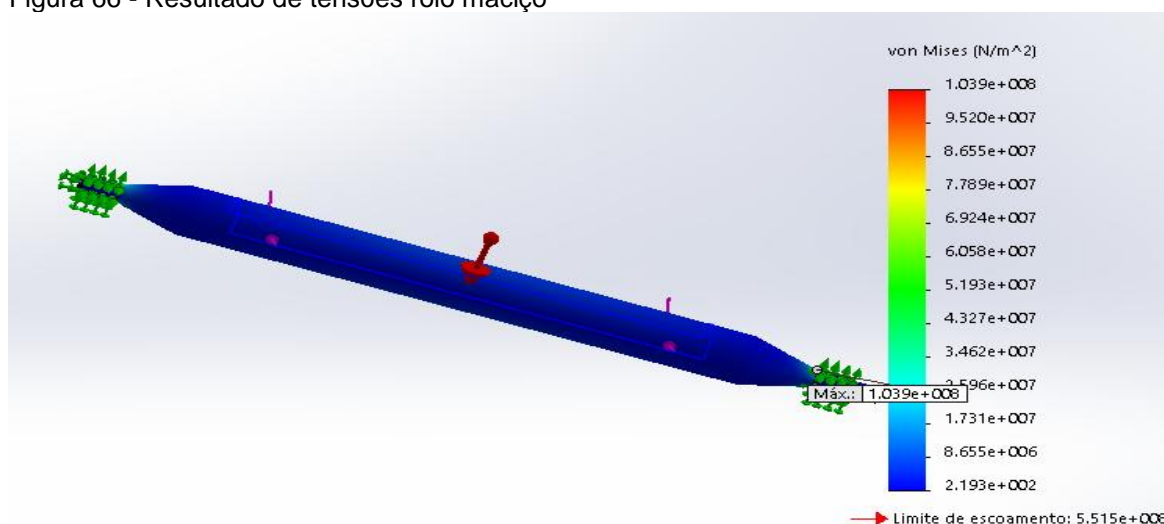
Fonte: O Autor (2018)

O desenho mostra uma geometria mais simples de construção, sem alterar as condições de utilização do equipamento, essas simplificações são traduzidas em uma fabricação mais simples.

#### 4.4.1 Análise De Elementos Finitos Melhorior B

Com as alterações feitas, a nova modelagem e a aplicação das condições de contorno são geradas as análises, os resultados para a tensão de von mises são mostrados na figura 66.

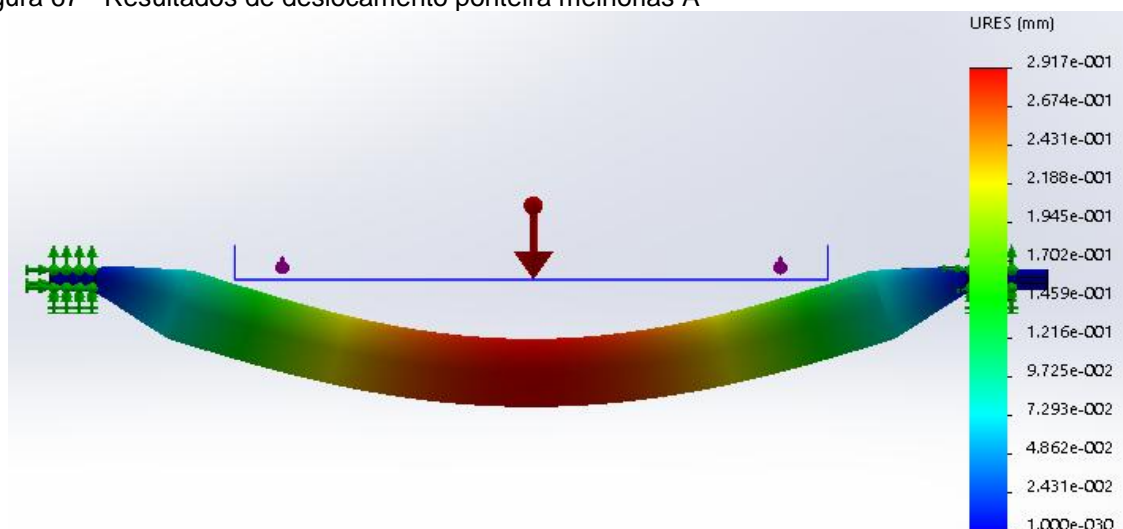
Figura 66 - Resultado de tensões rolo maciço



Fonte: O Autor (2018)

Na figura 67 são apresentados os deslocamentos em milímetros gerados pela aplicação da carga.

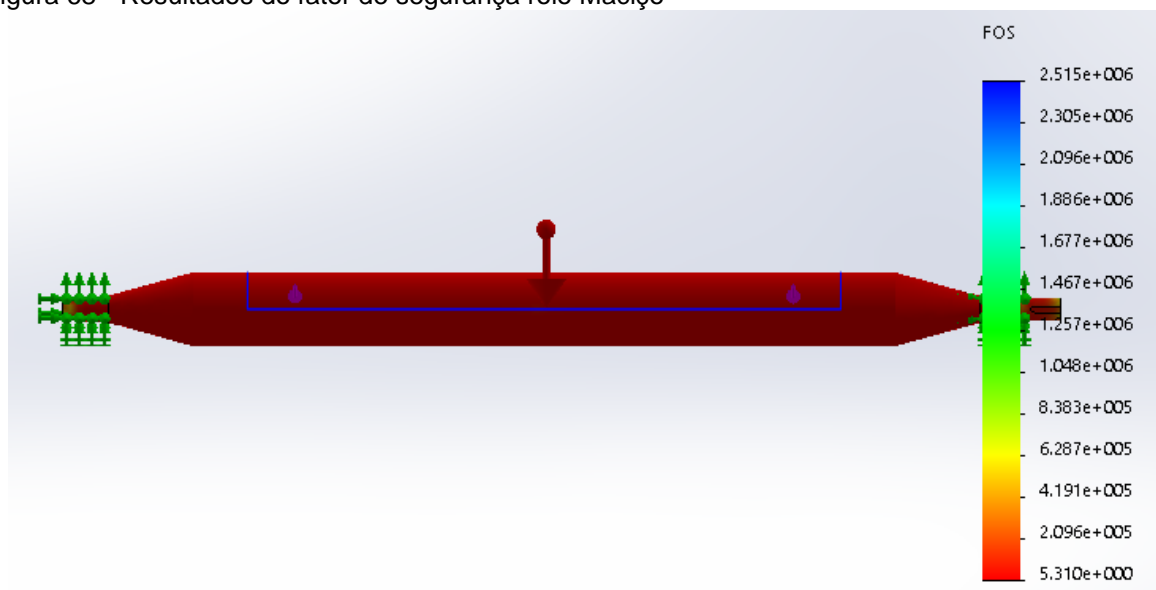
Figura 67 - Resultados de deslocamento ponteira melhorias A



Fonte: O Autor (2018)

Os resultados gerados para coeficiente de segurança são mostrados na figura 68.

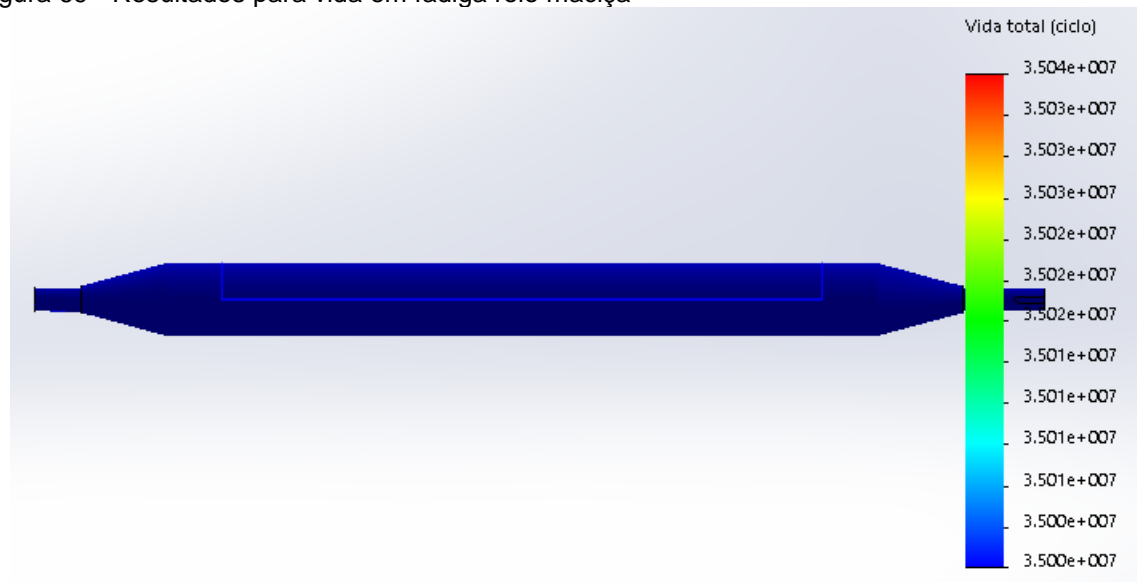
Figura 68 - Resultados do fator de segurança rolo Maciço



Fonte: O Autor (2018)

Por último são gerados os resultados da vida em fadiga do componente, esse resultado é mostrado na figura 69.

Figura 69 - Resultados para vida em fadiga rolo maciça



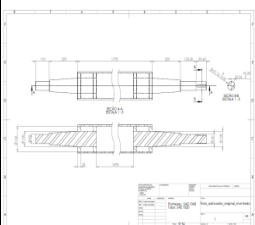
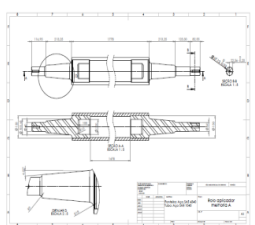
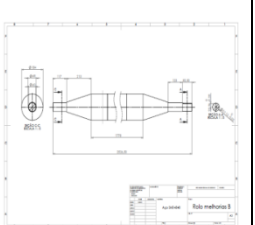
Fonte: O Autor (2018)

Com mais esses resultados apresentados se faz possível uma análise mais consistente para tomadas de decisões no campo da engenharia de manutenção, pode se ver que pequenas alterações de geometria podem influenciar da maneira significativa na resistência do componente.

#### 4.5 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS GERADOS

Com todos os resultados apresentados até aqui, pode ser feita uma compilação dos dados, e compara-los com o objetivo de entender as vantagens e desvantagens na aplicação de cada um. Uma tabela comparativa entre eles é apresentada:

Tabela 7 - Comparação entre os modelos de rolos aplicadores (integridade mecânica)

<b>COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE ROLOS APLICADORES (FATORES DE INTEGRIDADE MECÂNICA)</b>				
<b>MODELO DO ROLO APLICADOR</b>	<b>MODELO ORIGINAL</b>	<b>MODELO MODIFICADO A</b>	<b>MODELO MODIFICADO B</b>	<b>VANTAGENS/DESVANTAGENS</b>
				
<b>TENSÃO DE VON MISES (MPa)</b>	359	218	103,9	↓ QUANTO MENOR MELHOR
<b>DESLOCAMENTO RELATIVO (mm)</b>	1,346	0,6637	0,2917	↓ QUANTO MENOR MELHOR
<b>COEFICIENTE DE SEGURANÇA</b>	1,539	2,533	5,31	↑ QUANTO MAIOR MELHOR
<b>VIDA EM FADIGA (Ciclos)</b>	3,50E+07	3,50E+07	3,50E+07	↑ QUANTO MAIOR MELHOR
<b>VIDA DO COMPONENTE (Dias)</b>	101	101	101	↑ QUANTO MAIOR MELHOR

Fonte: O Autor (2018)

Podem ser vistos na tabela 7 os dados gerados pelas análises de elementos finitos, os dados da vida do componente acabaram apresentando valores iguais, isso é, para todos os casos apresentados o tempo de utilização na linha de produção seria o mesmo, do ponto de vista de melhoria no componente esse dados não são de grande relevância, pois independente das mudanças não houve melhorias no tempo de vida, todavia do ponto de vista da manutenção preditiva, da gestão de

paradas de manutenção e gestão de sobressalentes é uma informação primordial, pois conhecendo o tempo de vida do componente, é possível ser bem mais assertivo em todos esses campos, programando as paradas em momentos estrategicamente acordados pelas gerências de produção e manutenção e se preparando para isso em relação a sobressalentes.

No que se refere aos outros itens da tabela, tensão de von mises, deslocamento do componente e coeficiente de segurança, as melhorias foram visíveis, o modelo modificado B apresentou os melhores resultados, seguido pelo modelo modificado A, enquanto o modelo original apresentou os piores resultados.

A tensão de von mises é a que governa as falhas iniciais de um componente mecânico, todos os materiais possuem uma tensão na qual sua resistência a deformação é superada, ela é chamada de tensão de escoamento, quando submetidos a esforços, os componentes mecânicos ficam expostos a tensões, quando essas tensões internas superam a tensão de escoamento o elemento tende a falhar, por isso a importância de manter essas tensões internas em valores baixos, os concentradores de tensão (canais de chaveta, raios de adoçamento pequenos, canais de anéis travas) apresentam regiões onde a tendência de falha é maior, essas pequenas mudanças no projeto apresentaram as melhorias vistas na tabela.

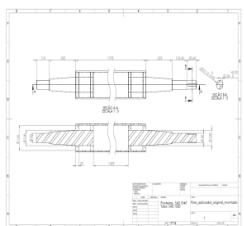
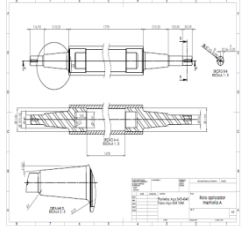
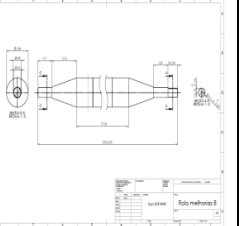
Os deslocamentos do componente precisam ser o menor possível, apesar de um deslocamento maior não indicar necessariamente a falha do componente, pois essa pode acontecer em regime elástico e voltar a condição original após o fim do esforço, esses deslocamentos podem ser sentidos por outros componentes do sistema, como os mancais de rolamento que podem não suportar deslocamentos excessivos, ponteiras de motores acoplados que não suportam os desalinhamentos gerados ou ainda interferir no processo produtivo devido as mudanças de tração na chapa causadas por tais deslocamentos.

Os coeficientes de segurança estão ligados não apenas a integridade mecânica do componente, mas valores maiores de coeficientes estão vinculados também à confiabilidade do sistema, a fatores ligados a segurança dos colaboradores e também a fatores ambientais, visto que uma falha catastrófica nesse equipamento influencia em todos esses fatores.

Analisados os fatores de integridade mecânica devem ainda ser analisados os fatores ligados à fabricação do componente, dessa maneira é possível pela equipe

responsável uma análise de custo benefício, a tabela 8 mostra alguns dados sobre a fabricação.

Tabela 8 - Comparação entre os modelos de rolos aplicadores (Custos)

<b>COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE ROLOS APLICADORES (FATORES DE CUSTOS)</b>				
<b>MODELO DO ROLO APLICADOR</b>	<b>MODELO ORIGINAL</b>	<b>MODELO MODIFICADO A</b>	<b>MODELO MODIFICADO B</b>	<b>VANTAGENS/DESvantagens</b>
				
<b>PESO DO ROLO (Kg)</b>	127	206	423	↓ QUANTO MENOR MELHOR
<b>CUSTO DA MATÉRIA PRIMA PARA FABRICAÇÃO (Reais)</b>	R\$ 2.439,00	R\$ 2.792,00	R\$ 6.820,00	↓ QUANTO MENOR MELHOR
<b>TEMPO DE FABRICAÇÃO (Horas)</b>	40	40	16	↓ QUANTO MENOR MELHOR
<b>CUSTO DA MÃO DE OBRA (Reais/Hora)</b>	R\$ 60,00	R\$ 60,00	R\$ 60,00	↓ QUANTO MENOR MELHOR
<b>CUSTO TOTAL DA MÃO DE OBRA (Reais)</b>	R\$ 2.400,00	R\$ 2.400,00	R\$ 960,00	↓ QUANTO MENOR MELHOR
<b>CUSTO TOTAL PARA FABRICAÇÃO (Reais)</b>	R\$ 4.839,00	R\$ 5.192,00	R\$ 7.780,00	↓ QUANTO MENOR MELHOR

Fonte: O Autor (2018)

A tabela 8 demonstra os valores para fabricação de cada modelo de rolo, é possível observar que o modelo original tem os menores custos, seguido de perto pelo modelo modificado A, a pequena diferença de custos entre os dois, comparada ao benefícios gerados, justifica a fabricação do segundo modelo.

O terceiro colocado em relação aos custos foi o modelo modificado B, que por sua vez apresentou os melhores resultados em relação aos fatores de integridade mecânica, se fossem apenas considerados os valores de custos de fabricação a opção pelo modelo modificado B também seria facilmente justificada, entretanto quando são analisados os valores de peso de cada rolo, esse modelo apresenta valores duas vezes maiores que o modelo modificado A, esses valores influenciam na operação dos mancais de rolamento, para a aplicação desse modelo é necessária uma avaliação mais minuciosa a respeito dos componentes que integram o sistema, a substituição de outros elementos do sistema poderia influenciar nos custos de instalação desse modelo.

Outra comparação a ser feita em relação a custos envolve a fabricação dos rolos com mão de obra interna na empresa ou a terceirização do serviço e compra externa, o orçamento enviado para a companhia para a fabricação externa de um rolo conforme o modelo original foi de R\$ 63 000,00, valor que poderia pagar a fabricação de oito rolos do modelo modificado B. outras vantagens em relação à fabricação interna seriam o tempo para entrega, que seria menor, devido a fatores como escopo de contrato, licitação de mão de obra, logística de entrega, etc e ainda a possibilidade de acompanhamento da atividade no local, possibilitando identificar as dificuldades e oportunidades de melhorias.

Devido ao fato da aplicação do modelo modificado B depender de estudos relacionados a fatores que não estavam dentro da área de controle na qual esse trabalho se comprometeu em trabalhar, como estudo das capacidades dos mancais, motor e redutores, e ainda pela facilidade em utilizar os materiais necessários para o modelo modificado A, este foi o escolhido para a fabricação interna, as informações sobre sua fabricação são apresentadas no capítulo seguinte.

#### 4.6 SINTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

No capítulo 4 foram apresentados os métodos adotados para análise de elementos finitos, bem como o passo a passo para cada análise, foi demonstrado através das análises o elemento crítico do equipamento, ainda foram apresentados duas propostas de melhorias para o componente crítico do rolo aplicador de tinta,

para todos os casos puderam ser vistos os resultados para as análises de tensão de von mises, deslocamento, fator de segurança e vida em fadiga.

Os resultados gerados são de grande importância para o trabalho, pois através delas é possível tomar decisões como períodos para paradas de manutenção, tempo dessas paradas, gestão de sobressalentes, processos para fabricação dos rolos, escolha entre fabricação própria ou terceirizada entre outras.

Os inúmeros campos que podem se beneficiar com os resultados apresentados para as suas respectivas tomadas de decisão evidenciam a importância desses dados apresentados, e ainda demonstram que as ferramentas de análises de elementos finitos, usualmente utilizadas em projetos, podem ser utilizadas como ferramenta de auxílio nas práticas de manutenção preditiva e engenharia de manutenção.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões e considerações finais sobre o que foi abordado neste trabalho, os benefícios gerados a empresa e ainda as sugestões de trabalhos futuros.



## 5 CONCLUSÃO

O trabalho até aqui apresentado demonstrou a capacidade da ferramenta de análises de elementos finitos na engenharia de manutenção, algumas dificuldades foram encontrados na pesquisa, como a falta de pesquisas similares que possam servir como base, ou ainda o tempo necessário para se realizar uma análise robusta.

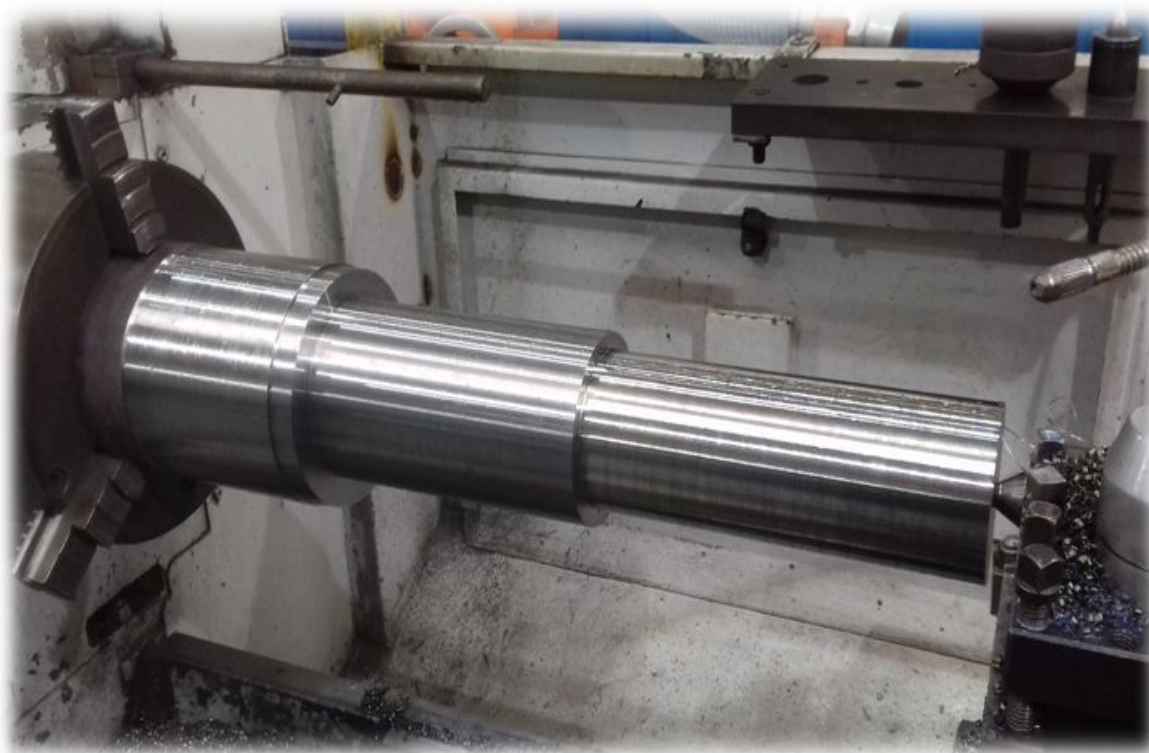
Ainda com essas dificuldades os resultados positivos bem como o potencial da ferramenta ficam evidentes quando aplicadas em conjunto com os conceitos de engenharia de manutenção.

Alguns resultados irão ficar mais evidentes após a geração de histórico após a utilização no novo modelo proposto, projetado e fabricado. A seção a seguir apresenta o processo de fabricação dos novos rolos.

### 5.1 FABRICAÇÃO DO MODELO

Conforme descrito no capítulo anterior, o modelo modificado A foi o escolhido para a fabricação, na figura 70 pode ser visto a usinagem previa de uma ponteira.

Figura 70 - Usinagem da ponteira



Fonte: O Autor (2018)

A usinagem do tubo principal é mostrada na figura 71.

Figura 71 - Usinagem do tubo principal



Fonte: O Autor (2018)

Com a usinagem dos três componentes do conjunto pode ser feita a montagem, devido ao preciso ajuste envolvido, essa montagem exige o aquecimento do tubo para ser feito, a figura 72 apresenta o tubo no forno em processo de aquecimento.

Figura 72 - Tubo sofrendo dilatação para montagem



Fonte: O Autor (2018)

Após a montagem dos componentes esses ficam disponíveis para solda como é mostrado na figura 73.

Figura 73 - Rolo montado aguardando solda



Fonte: O Autor (2018)

Depois de soldado o rolo volta para usinagem, onde passa pelas últimas operações, uma dessas operações é apresentada na figura 74. É importante lembrar que as operações apresentadas da figura 70 a 73 se resumiriam apenas a operação apresentada na figura 76, caso o modelo utilizado fosse o modelo modificado B, pois esse seria maciço, não precisaria de ajustes, aquecimento para montagem, solda, etc.

Figura 74 - Rolo em operação de usinagem



Fonte: O Autor (2018)

Um par de rolos concluídos é apresentado na figura 75.

Figura 75 - Rolos concluídos



Fonte: O Autor (2018)

Após terem as etapas de usinagem concluídas os rolos são mandados para fora da empresa, onde recebem o revestimento de borracha. Atualmente existe um par de rolos do modelo modificado A aguardando por essa operação, assim que retornarem esses rolos entrarão no processo e serão testados pelos próximos meses. Os testes serão capazes de validar as teorias abordadas nesse trabalho.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A conclusão desse trabalho gera a oportunidade para outros trabalhos que podem ser feitos no futuro, os principais são listados a seguir

### 5.2.1 Validação De Resultados Através De Ensaio Práticos

Após a instalação dos rolos de modelo modificado A na linha de produção seria de boa prática seu acompanhamento, e a elaboração de testes que pudessem validar os resultados elaborados por esse trabalho.

### 5.2.2 Estudo De Viabilidade De instalação Do Rolo Modificado B

Uma sugestão para trabalhos futuros seria o estudo da viabilidade dos equipamentos envolvidos no processo de pintura, para a fabricação e instalação do rolo maciço apresentado nesse trabalho, os resultados mostraram que ele pode apresentar condições de trabalho significativamente melhores para o processo, todavia sua instalação depende da garantia de outros equipamentos como mancais e redutores.

### 5.2.3 Aplicação Dos Métodos De Elementos Finitos Para Diversos Tipos De Componentes Voltados A Manutenção Preditiva E Engenharia De Manutenção.

O presente trabalho propôs a aplicação dos métodos de elementos finitos na engenharia de manutenção para um tipo de eixo rotativo, mas podem ser inúmeras as aplicações, como chapas em flexão, vigas, molas, engrenagens, rolamentos, entre outros elementos, trabalhos futuros poderiam abordar a aplicação dos métodos nesses elementos.

## REFERÊNCIAS

NASCIF, Julio; DORIGO, Luiz Carlos. **Manutenção orientada para resultados**. 1.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2010.

GEITNER, Fred; BLOCH, Heinz. **Análise e solução de falhas em sistemas mecânicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

RAO, Singiresu. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

BUDYNAS, Richard; NISBETT, Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**. 8.ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2011.

NORTON, Robert. **Projeto de máquinas**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. **Um primeiro curso em elementos finitos**. 1. Ed. São Paulo: LTC, 2005.

KARDEC, Alan; NASCIF, Julio. **Manutenção: Função estratégica**. 3. Ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

KARDEC, Alan; NASCIF, Julio. **Manutenção Preditiva: Fator de sucesso na gestão empresarial**. 3. Ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.