



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Análise Estática e Dinâmica da mola externa da caixa de rolamento da locomotiva C30-ACi**

**Discente:**

Ferrão, Anacleto Henriques

**Supervisor da UEM:**

---

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup>. Justino Bernardo Mulima

**Supervisor dos CFM:**

---

Eng<sup>o</sup>. Dulcídio Lucas

Maputo, Julho de 2022



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Análise Estática e Dinâmica da mola externa da caixa de rolamento da locomotiva C30-ACi**

**Discente:**

Ferrão, Anacleto Henriques

**Supervisor da UEM:**

---

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup>. Justino Bernardo Mulima

**Supervisor dos CFM:**

---

Eng<sup>o</sup>. Dulcídio Lucas

Maputo, Julho de 2022



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Análise Estática e Dinâmica da mola externa da caixa de rolamento da locomotiva C30 ACi**

Eu, Anacleto Henriques Ferrão estudante do 5º nível do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, submeto este trabalho como requisito para a aquisição do grau de Licenciatura em Engenharia Mecânica.

Aprovado por:

.....  
Prof. Dr. Engº. Justino Bernardo Mulima, Supervisor da UEM

.....  
Engº. Dulcídio Lucas, Supervisor dos CFM

.....  
Membro de Júri 1

.....  
Membro de Júri 2

.....  
Membro de Júri 3

Maputo, julho de 2022

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABELAS.....	vi
LISTA DAS ABREVIATURAS UTILIZADAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
AGRADECIMENTOS .....	xi
Resumo .....	xii
CAPÍTULO I. ....	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objecto .....	3
1.3. Objectivos.....	3
1.3.1. Objectivo geral .....	3
1.3.2. Objectivos específicos.....	3
1.4. Justificativa.....	3
CAPÍTULO II. CONTEXTUALIZAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO .....	5
2.1. Apresentação da empresa .....	5
2.1.1. Direções executivas.....	6
2.1.2. Estrutura orgânica dos CFM.....	6
2.1.3. Organograma do Serviço de oficinas Gerais .....	8
2.1.4. Objectivos dos CFM .....	9
2.1.5. Frota de locomotivas dos CFM-SUL.....	9
2.2. Estado actual das quebras de molas na Locomotiva C30-ACi.....	9
2.2.1. Tipos de manutenção nos CFM-Sul .....	10

CAPÍTULO III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1. Linha Férrea .....	12
3.2. Material Circulante.....	12
3.3. Locomotiva diesel eléctrica .....	13
3.3.1. Componentes da locomotiva Diesel Eléctrica .....	13
3.3.2. Os bogies .....	15
3.3.3. Descrição do Sistema de Suspensão da Locomotiva C30-ACi .....	15
3.3.3.1. Suspensão primária .....	16
3.3.3.2. Suspensão secundária.....	18
3.4. Bogies, plataforma e aparelhos de choque tração .....	19
3.4. Principais avarias do Bogie .....	20
3.5. Molas .....	22
3.5.1. Molas Helicoidais de compressão .....	22
3.5.2. Principais parâmetros geométricos das molas helicoidais.....	23
3.5.3. Sequencia de cálculos da tensão das molas helicoidais de compressão.....	23
3.5.4. Cálculo da deformação .....	25
3.6. ANÁLISE ESTÁTICA.....	25
3.7. ANALISE DINÂMICA EM MOLAS .....	26
3.7.1. Análise de Fadiga .....	26
3.7.2. Análise do carregamento operacional.....	27
3.7.3. Tensões .....	27
3.7.4. Coeficientes de carregamento dinâmico .....	27
3.7.5. Resistência ao escoamento sob torção.....	28
3.7.6. Limite de resistência à fadiga torsional para carregamento repetido .....	28

3.7.7. Limite de resistência à fadiga torsional para carregamento alternado.....	28
3.7.8. COEFICIENTE DE SEGURANÇA PARA FALHA POR FADIGA TORCIONAL.	29
3.8. MODELAÇÃO COMPUTACIONAL .....	30
3.8.1. Método de Elementos Finitos.....	30
CAPÍTULO IV. METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA .....	32
4.1. Abordagem da investigação .....	32
4.2. Variáveis de investigação.....	32
CAPÍTULO V. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	33
5.1. Locomotiva C30-ACi.....	33
5.2. Apresentação de todas as características do material da mola, juntamente com as cotas da mesma .....	34
5.3. ANALISE ESTÁTICA.....	36
5.3.1. Sequencia do calculo da Tensão.....	36
5.3.2. Cálculo da deformação .....	37
5.5. ANALISE DINÂMICA.....	37
5.5.1. Resistência ao escoamento sob torção.....	37
5.5.2. Análise do carregamento operacional .....	37
5.5.3. Coeficientes de carregamento dinâmico.....	38
5.5.4. Tensões .....	38
5.5.5. Limite de resistência à fadiga torsional para carregamento repetido .....	39
5.5.6. COEFICIENTE DE SEGURANÇA PARA FALHA POR FADIGA TORCIONAL.	40
5.6.1. Análise numérica .....	42
5.6.2. Geração do modelo físico .....	42
5.6.3. Escolha das propriedades do material.....	43

5.6.4. Aplicação da carga e condições de contorno.....	44
5.6.5. Análise dos resultados.....	46
5.7. Análise dos resultados .....	51
CAPITULO VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	52
6.1. Conclusões.....	52
6.2. Recomendações .....	53
6.3. Propostas de trabalhos futuros.....	53
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54
ANEXOS .....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Edifício principal dos CFM-Sul na baixa da Cidade de Maputo.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2: Estrutura orgânica dos CFM. ....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3: Organograma dos serviços de oficinas gerais .....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4: Ilustração das quebras mais frequentes de molas de diversas locomotivas em circulação nos CFM- Sul.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5: Constituintes da via permanente. ....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 6: locomotiva diesel-elétrica em corte.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 7: Bogies do tipo C .....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 8: Elementos de suspensão primária (Mola helicoidal).....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9: amortecedores telescópicos.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 10: Molas helicoidais e coxins de borracha e aço. ....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 11: Vista superior e lateral de um bogie. ....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 12: Características de uma mola helicoidal.....</i>	<i>22</i>
<i>13: Figura 13: (a) diagrama de corpo livre mostrando que o fio está sujeito a um cisalhamento direto e outro de torção. (b) Mola helicoidal carregada longitudinalmente. ....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 14: Diagrama de Goodman modificado mostrando a linha de carga e dados necessários para cálculo do coeficiente de segurança de uma mola de compressão carregada dinamicamente. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 15: Vista lateral da locomotiva C30-ACi. ....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 16: Molas da suspensão primaria locomotiva C30-ACi. ....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 17: Diagrama de Goodman modificado mostrando os dados diagramados.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 18: Modelo físico da mola gerado no software. ....</i>	<i>43</i>

<i>Figura 19: Introdução das propriedades mecânicas do material SAE 5160.</i>	44
<i>Figura 20: Escolha do ponto de apoio e aplicação de carga.</i>	45
<i>Figura 21: Malha gerada da mola.</i>	45
<i>Figura 22: Tensão de Von Misses obtida da simulação da mola.</i>	46
<i>Figura 23: Região de maior tensão da mola.</i>	47
<i>Figura 24: Deslocamento em no eixo y, obtido da simulação da mola.</i>	47
<i>Figura 25: Região com os maiores deslocamentos na mola.</i>	48
<i>: Figura 26: factor de segurança de fadiga.</i>	49
<i>Figura 27: Região com menor factor de segurança de fadiga.</i>	49
<i>Figura 28: ilustra a região onde localiza-se o concentrador de tensão e de onde as molas rompem.</i>	52

## **ÍNDICE DE TABELAS**

<i>Tabela 1: disponibilidade de locomotivas do CFM-Sul</i>	9
<i>Tabela 2: Histórico de avarias das molas das locomotivas C30-ACi nos CFM-Sul.</i>	10
<i>Tabela 3: Periodicidade do plano de manutenção do MT do CC.</i>	11
<i>Tabela 4: Componentes de uma locomotiva diésel eléctrica.</i>	14
<i>Tabela 5: principais avarias do bogie</i>	21
<i>Tabela 6: Características da Mola a analisar.</i>	35
<i>Tabela 7: Características do material SAE 5160</i>	36
<i>Tabela 8: variáveis inseridas no software</i>	42
<i>Tabela 9: Resultados das análises estática, pelos métodos numérico e analítico.</i>	50
<i>Tabela 10: Resultados das análises estática (deformação), pelos métodos numérico e analítico</i>	50

*Tabela 11: Resultados das análises de fadiga, pelos métodos numérico e analítico..... 50*

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

*Anexo 1: mola da caixa de rolamentos..... 56*

*Anexo 2: Caixa de rolamentos..... 56*

*Anexo 3: Sistema de suspensão primária ..... 56*

## LISTA DAS ABREVIATURAS UTILIZADAS

SAE-----	Society of Automotive Engineers
AC-----	Corrente Alternada
AMV-----	Aparelho de Mudança de Via
CNT-----	Confederação Nacional do Transporte
CFM-SUL-----	Caminhos de Ferro de Moçambique – Direcção Executiva Sul
DPG-----	Departamento de Produção Geral
DCO-----	Departamento de Conservação Oficial
DC-----	Corrente Contínua
EP-----	Empresa Publica
PFC-----	Projecto de Final de Curso
GE-----	General Electric
GM-----	General Motor
IC-----	Inspeção de Conservação
IV-----	Inspeção de Viagem
VP-----	Via Permanente
R1-----	Revisão de um ano
R2-----	Revisão de dois anos
R3-----	Revisão de três anos
RH-----	Recursos Humanos
MTTF-----	Tempo medio para a falha
MTTR-----	Tempo medio para o reparo

MM-----Material Motor  
MR-----Material Rebocado  
MEF-----Método de Elementos Finitos  
SOG-----Serviço de Oficinas Gerais  
STF-----Serviço de Transporte Ferroviário  
SSPRM-----Serviços Sociais da Polícia da República de Moçambique

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
A	área	m <sup>2</sup>
C	índice de mola	-
K <sub>b</sub>	coeficiente de carga estático	-
K <sub>s</sub>	coeficiente de carga alternante	-
K <sub>w</sub>	coeficiente de carga dinâmico	-
F <sub>max</sub>	força máxima	N
F <sub>min</sub>	força máxima	N
F <sub>a</sub>	força máxima	N
F <sub>m</sub>	força máxima	N
D <sub>e</sub>	diâmetro externo da mola	m ou mm
D <sub>i</sub>	diâmetro interno da mola	m ou mm
d	diâmetro do arame da mola	m ou mm
D <sub>m</sub>	diâmetro médio da mola	m ou mm
δ	deformação	m ou mm
ν	coeficiente de poisson	-
τ <sub>m</sub>	tensão media	MPa
τ <sub>a</sub>	tensão alternada	MPa
τ	tensão	MPa
n <sub>f</sub>	factor de segurança	-
S <sub>ut</sub>	tensão de limite à tracção	MPa
S <sub>su</sub>	tensão de roptura ao corte	MPa
S <sub>sa</sub>	tensão limite de resistência alternante	MPa
S <sub>sm</sub>	tensão limite de resistência media	MPa
S <sub>e</sub>	tensão limite de resistência à Fadiga	MPa
E	modulo de elasticidade	MPa
G	modulo de elasticidade transversal	MPa

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus por guiar-me durante todo o meu percurso académico e social, dando-me saúde, força e coragem face às adversidades que tenho enfrentado.

Agradeço aos meus pais, Júlio Lomelino Henriques Ferrão e Joana Fabião Gomana pelo suporte, amor, incentivo e conselhos quanto à vida académica como também a social. Aos meus irmãos Fernandel Siquice e Agnecy S.H. Ferrão pelo apoio moral e motivação para seguir até este momento.

A todos meus professores e, em especial aos meus supervisores, Eng.º Justino Bernardo Mulima ao Eng.º Dulcídio Lucas e ao Eng.º Hassane pela disponibilidade, atenção e apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

Enfim agradecer aos SSPRM e a todos que directa ou indirectamente contribuíram de alguma forma na minha formação.

## **Resumo**

A empresa CFM possui locomotivas do modelo C30-ACi. As locomotivas possuem como um dos elementos fundamentais para o seu funcionamento os bogies, nos quais estão inseridos os elementos de suspensão primaria. A suspensão primaria tem como um dos principais elementos a Mola helicoidal externa da caixa de rolamentos, que garantem o bom funcionamento e a longevidade da locomotiva, amortecendo os choques que provem da via permanente para a superestrutura. Pelo facto de se registar falhas constantes das molas que causam mau funcionamento da locomotiva e paragens prejudiciais a produtividade da empresa. E por causa dessa situação surge a necessidade da realização da presente analise, com o objetivo de descobrir as causas por detrás dessa falha para propor uma solução melhor que não seja apenas a substituição constante da mola.

Palavras-Chave: Locomotiva, Bogie, Suspensão primaria, Mola

# **CAPÍTULO I.**

## **1.1.Introdução**

As locomotivas são os veículos responsáveis por proporcionar tracção para a composição (Conjunto de vagões e ou carruagens), sendo composição os elementos rebocados permitindo a translação do comboio.

A nível dos CFM-Sul regista-se com preocupante frequência, a entrada de locomotivas C30-ACi para oficina com principal avaria sendo a quebra ou deficiência mecânica das molas externas das caixas de rolamentos, que são um dos elementos do sistema de suspensão.

Como foi citado por (Borba, 2011), o sistema de suspensão é um elemento indispensável para o funcionamento de um veículo ferroviário, pois proporciona aderência do bogie aos carris e a utilização eficiente das forças de tracção, amenizando os impactos provenientes da interacção roda-carril, amortecendo também todo o peso da locomotiva.

Este trabalho visa a análise estática e dinâmica da mola externa da caixa de rolamentos da locomotiva C30-ACi usada nos CFM-Sul para o transporte de pessoas e bens, e está dividido em 6 capítulos e apresenta 28 figuras e 11 tabelas.

No capítulo I apresenta-se os aspectos introdutórios do trabalho bem como o objecto, os objectivos e as razões que motivaram este estudo.

No capítulo II apresentam-se os a empresa CFM-Sul como o contexto da investigação. Igualmente faz-se a apresentação do histórico da roptura das molas nas locomotivas C30-ACi bem como as práticas de manutenção adoptadas actualmente.

No capítulo III apresentam-se os principais debates teóricos e evidências de trabalhos relacionadas análise estática e dinâmica da mola e as diferentes abordagens concernentes aos principais métodos aplicados nesta análise. Por fim, apresenta-se a evolução histórica do objecto de estudo.

No capítulo IV trata-se a metodologia da resolução do problema, bem como as variáveis de estudo para aclarar sobre os pressupostos que se buscam analisar.

No capítulo V apresentam-se a discussão e análise de resultados da análise, através de métodos de modelagem da mola, modelos analíticas e numéricos.

E finalmente no capítulo VI apresentam-se as conclusões, recomendações e propostas para trabalhos futuros decorrentes da realização.

## **1.2. Objecto**

O objecto do presente estudo é a mola externa da caixa de rolamentos da locomotiva C30-ACi.

## **1.3. Objectivos**

### **1.3.1. Objectivo geral**

- Familiarização com o funcionamento e organização duma empresa

### **1.3.2. Objectivos específicos**

- Analisar as causas da ruptura precoce da mola externa da caixa de rolamentos da locomotiva C30-ACi.
- Análise estática da mola, através de modelos analítico e numéricos;
- Análise de fadiga da mola, através de modelos analítico e numéricos;
- Propor práticas voltadas para a confiabilidade e aumento da vida útil das molas.

## **1.4. Justificativa**

Veículos ferroviários quando em operação são imposto a uma ampla gama de factores, sendo que os esforços envolvidos neste evento podem vir a causar a perda de eficiência, tanto quanto a danificação de algum componente.

Devido à importância do sistema de suspensão, faz-se necessário o conhecimento de cada uma das partes envolvidas nele, por conseguinte, o desempenho dos veículos ferroviários é de grande importância, sendo a análise do comportamento da mola, essencial para o melhor funcionamento do veículo, visto que a suspensão é responsável pela maior parte do amortecimento dos choques resultantes das irregularidades da via permanente.

A manutenção ferroviária também é um fator de grande influência visto que a má ou não realização desta etapa, acarretará num agravamento das falhas, ficando o veículo cada vez mais propício ao surgimento de novas falhas.

De maneira geral, qualquer avaria numa locomotiva aumenta os tempos de espera e a taxa de consumo de combustível, pondo em causa a sustentabilidade do sistema (Imhof 2014).

Como já foi acima referenciado, uma das avarias mais frequentes nas locomotivas diesel-eléctricas C30-ACi a nível dos CFM está relacionada com a quebra ou deficiência mecânica da mola helicoidal do sistema de suspensão o que tem comprometido a integridade da operação.

Levando-se em conta o elevado valor agregado dos veículos ferroviários, é de extrema importância que as condições de funcionamento estejam em boa qualidade, o que diminui o tempo necessário para reparos, acarretando em um aumento da capacidade de operação do veículo, que consecutivamente proporcionará maior eficiência e diminuição dos gastos.

## CAPÍTULO II. CONTEXTUALIZAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO

### 2.1. Apresentação da empresa

A Empresa dos CFM é uma entidade pública vocacionada na exploração comercial e industrial do transporte, ferroviário e portuário, actuando no sentido de suprir as necessidades de mobilidade e facilitar a circulação de pessoas e de bens, aquém e além-fronteiras. A figura 1. mostra o edifício principal dos CFM na baixa da Cidade de Maputo.



Figura 1:Edifício principal dos CFM-Sul na baixa da Cidade de Maputo.

Fonte: ([www.cfm.co.mz](http://www.cfm.co.mz))

Os Portos e Caminhos-de-Ferro de Moçambique, EP (CFM) desempenham um papel importante no desenvolvimento económico nacional e regional, constitui também um importante vínculo na consolidação da unidade nacional, já que a sua acção se estende por grande parte do território nacional (CFM 2016), conforme atesta a distribuição das direcções executivas que se apresentam a seguir.

### **2.1.1. Direções executivas**

As direções executivas estão estabelecidas em função da divisão política e regional. Nesse sentido, pode-se considerar que o sistema ferroviário nacional esteja dividido em três zonas distintas, a saber (CFM 2016):

- Zona Sul, com o Porto de Maputo e as vias-férreas que vão para os países vizinhos, África de Sul, Zimbabwe e Suazilândia.
- Zona Centro, com o Porto da Beira e as vias-férreas que se dirigem para a fronteira com o Zimbabwe, o Malawi ainda para a província de Tete.
- Zona Norte, com Nacala como Porto e a linha férrea que se dirige para a Província do Niassa, Tete e para o Malawi.

### **2.1.2. Estrutura orgânica dos CFM**

A estrutura orgânica dos CFM integra o conselho de administração e as três direções supramencionadas. Organograma apresentado na figura 2 demonstra de forma elucidativa as relações que estabelecem entre os diferentes órgãos, sendo particularmente importante, aquela entre o conselho de administração e as direções regionais.

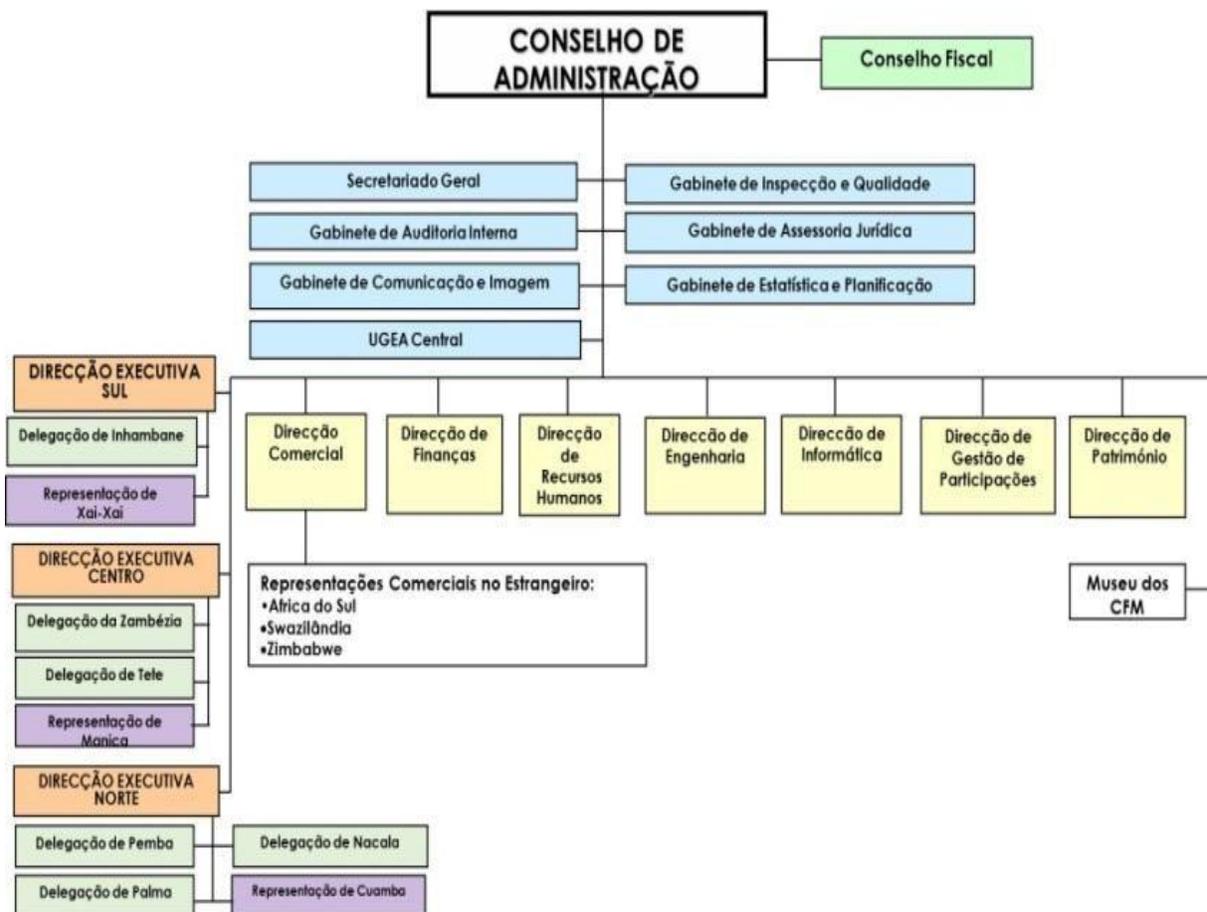


Figura 2: Estrutura orgânica dos CFM.

Fonte ([www.cfm.co.mz](http://www.cfm.co.mz))

Na estrutura acima, interessa destacar a Direcção de Engenharia, dado que integra em si vários órgãos de gestão da manutenção, nos quais se inclui o Serviço de Oficinas Gerais (SOG), sendo este último o que coordena os serviços de manutenção das Locomotivas. Por sua vez, a nível do SOG, as manutenções focalizadas nos sistemas de suspensão são atendidas por um departamento especializado denominado **Material Motor (local do estagio)**. E na figura a baixo está representado o organograma do Serviço de Oficinas Gerais (SOG),

### 2.1.3. Organograma do Serviço de oficinas Gerais

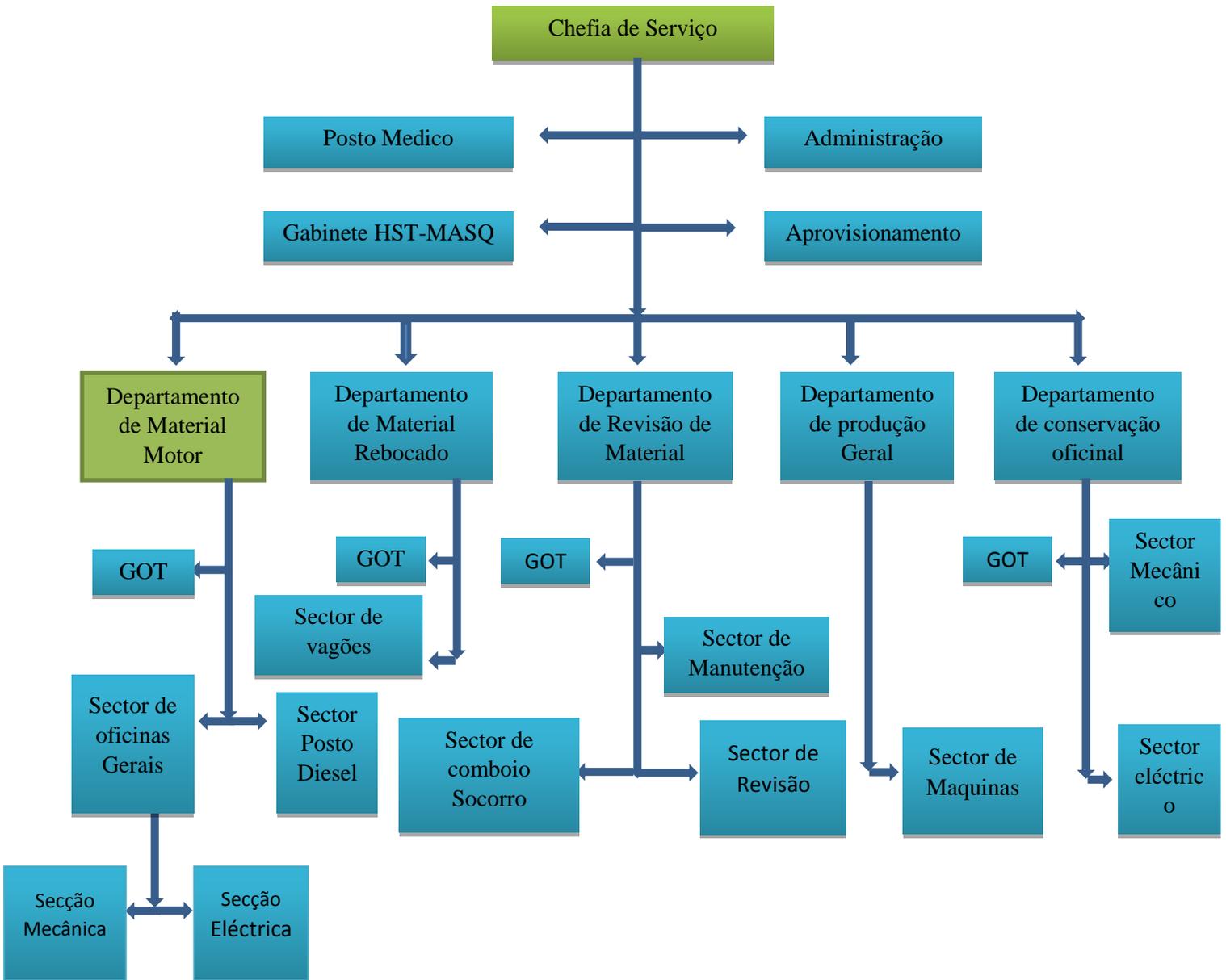


Figura 3: Organograma dos serviços de oficinas gerais

## 2.1.4. Objectivos dos CFM

CFM têm como objectivo o transporte de passageiros, de carga e a prestação de serviços portuários (CFM 2016). De modo mais concreto os CFM actuam no sentido de:

- Promover e desenvolver as infraestruturas ferro-portuárias;
- Operar o sistema ferro-portuário, promovendo a actividade logística de bens, mercadorias, transporte de passageiros;
- Maximizar a racionalização do uso dos activos incrementando a sua rentabilidade.

## 2.1.5. Frota de locomotivas dos CFM-SUL

Tabela 1: disponibilidade de locomotivas do CFM-Sul

Locomotiva		Quantidade	Fabricante	Potência (HP)	Esforço tractor - $E_t$ (tons)	Serviço
Designação oficial	Designação interna					
RL30SCC-3	D001 até D005 D3001 até D3005	10	GM	3000	2700	Operação
C30ACI	D701 até D715	12	GE	3000	2700	Operação
WDM2C	D612 e D613	2	GE	3000	2700	Operação
YDM4A	D606 e D608	2	ALCOM	1500	1200	Operação
U20C	D52 até D131	16	GE	1500	1200	Operação Manobra
U10B	D501 até D502	2	GE	1000	800	Manobra

Fonte: Departamento de tracção (Agosto, 2019)

## 2.2. Estado actual das quebras de molas na Locomotiva C30-ACi

Os dados mais actualizados sobre o histórico de quebra das molas dos bogies das locomotivas C30-ACi, indicam que de um modo geral por viagem uma das molas do sistema de suspensão é afectada especialmente nos Eixos 4 e 5. A linha em que esses casos são mais verificados é a de Ressano Garcia, o que pode estar ligado ao maior volume de trafego nela transportado e a nível dos CFM-Sul. Um resumo geral do histórico das avarias de molas da locomotiva C30-ACi nos CFM-Sul é apresentado na Tabela 4.

Tabela 2: Histórico de avarias das molas das locomotivas C30-ACi nos CFM-Sul

Loco.	Data	Quilômetros (Milhas)	Molas quebradas	Tipo	Data da falha	Local da falha	Localização da mola	Estado da Loco
D702	12/12/2013	85499	1	Externa	10/05/2017	Linha de Limpopo	Eixo #4	Operacional
D703	14/12/2013	85499	1	Externa	7/03/2016	Linha de Ressano Garcia	Eixo #5	Operacional
D704	20/12/2013	98387	1	Externa	5/08/2015	Linha de Ressano Garcia	Eixo #2	Operacional
D705	13/01/2014	85499	1	Externa	15/11/2016	Linha de Ressano Garcia	Eixo #4	Operacional
D708	05/05/2014	97870	2	Externa	12/05/2017	Linha de Limpopo	Eixo #1 & 5	Operacional

Fonte: Departamento de Material Motor – Oficinas gerais (Janeiro de 2020)

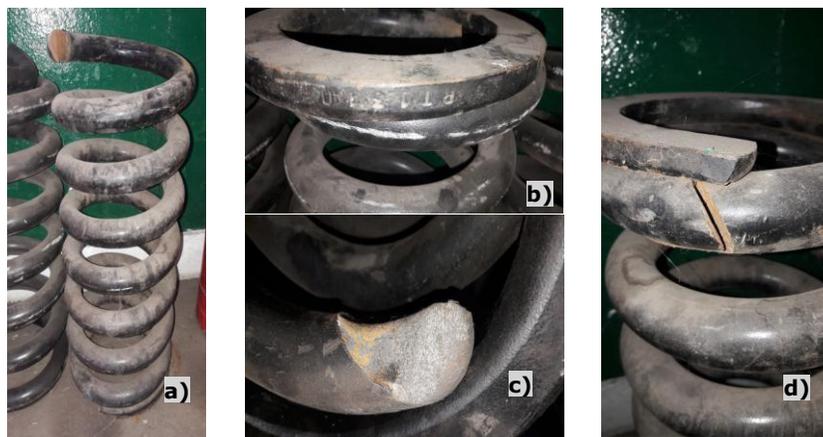


Figura 4: Ilustração das quebras mais frequentes de molas de diversas locomotivas em circulação nos CFM- Sul.

Fonte: Departamento de Material Motor – Oficinas gerais

- a) Quebra da mola com uma ilustração de perspectiva;
- b) A base de sustentação da mola;
- c) Quebra frágil da Mola, mostrando que esta é fabricada de um material duro e
- d) O encaixe das duas extremidades quebradas da locomotiva C30-ACi.

### 2.2.1. Tipos de manutenção nos CFM-Sul

De acordo com os dados apresentados pelo departamento de MR As manutenções das locomotivas feitas nos CFM-Sul, são do tipo preventivas por tempo ou sistêmicas. Complementarmente, os CFM-Sul realizam também a manutenção preditiva, sobretudo nas

locomotivas mais antigas. Resumidamente, os ciclos das intervenções dos CFM-Sul são apresentados na Tabela 3.

Assim, a manutenção correctiva é perfeitamente justificável sempre que:

- Os custos das possíveis falhas, incluindo o lucro cessante, forem menores que investimentos necessários para evitá-los e/ou quando os problemas de segurança e do meio ambiente gerados pelas possíveis falhas são aceitáveis pela empresa, seus colaboradores e pela comunidade;
- Existirem componentes com falhas aleatórias, sem padrão de degradação ou sinalização de defeitos;
- A empresa adote uma política de renovação frequente

Tabela 3: Periodicidade do plano de manutenção do MT do CC.

Nome	Sigla	Tipo	Periodicidade
Inspeção de Viagem	IV	Inspeção	Inspeção realizada após cada viagem
Inspeção de Conservação	IC	Inspeção	Inspeção realizada a cada 23 dias
Revisão de um ano	R1	Revisão	Inspeção realizada após 1º, 5º e 7º anos do ciclo.
Revisão de dois anos	R2	Revisão	Inspeção realizada após 2º ano do ciclo
Revisão de três anos	R3	Revisão	Inspeção realizada após 3º ano do ciclo
Revisão de quatro anos	R4	Revisão	Inspeção realizada após 4º ano do ciclo
Revisão de seis anos	R6	Revisão	Inspeção realizada após 6º ano do ciclo
Revisão de oito anos	R8	Revisão	Inspeção realizada após 8º ano do ciclo

Fonte: (CFM 2016)

## CAPÍTULO III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Linha Férrea

Linha Férrea ou Via permanente é o conjunto das instalações e equipamentos que compõem as partes da via onde circulam os comboios.

A via permanente é constituída por duas estruturas principais, como se ilustra na figura 5.

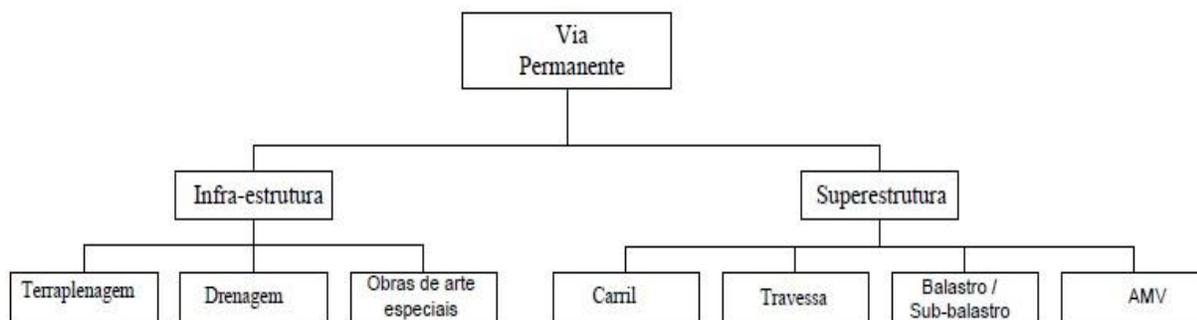


Figura 5: Constituintes da via permanente.

Fonte: (Rosa 2012)

### 3.2. Material Circulante

De um modo geral, considera-se material circulante ferroviário —todo o veículo provido de rodas que se movimenta sobre os carris (Silva, 2012: 14). Este material possibilita o transporte, pode ser dividido em três grupos: Material Motor, Material Rebocado e Automotoras (CFM 2016).

Entende-se por material motor os veículos que se deslocam com seus próprios meios, ou seja, veículos que não necessitam de um reboque para que possam mover-se, tais como: Locomotivas, Automotoras e Zorras. Por sua vez, o material rebocado corresponde aos veículos que necessitam de outros meios para se deslocarem, tais como: Salões, Carruagens Furgões, Vagões entre outros (CFM 2016). Outra diferença evidente entre o material motor e reboco resume-se na estrutura do bogie, sendo o dos veículos motores mais complexos e com a componente de tracção incluída. Ou seja, é nos bogies das locomotivas que se instalam os

sistemas de transmissão mecânica e o motor de tração que permite converter a energia eléctrica em energia mecânica garantindo o movimento da composição (Rosa 2012).

### **3.3. Locomotiva diesel eléctrica**

Por definição, as locomotivas são os veículos responsáveis por proporcionar tração para o trem, sendo os vagões os elementos que serão puxados ou empurrados (MATTOS, 2006).

Uma locomotiva diesel-elétrica caracteriza-se pela sua forma de funcionamento, transformando de energia química em mecânica e posteriormente mecânica em eléctrica (BETTAZZI, 2013).

De maneira geral, em operações ferroviárias de plena via necessita-se de, pelo menos, um veículo motor para cada setenta veículos rebocados, sendo que qualquer avaria em uma locomotiva implica na paralisação do sistema.

#### **3.3.1. Componentes da locomotiva Diesel Eléctrica**

A figura 6 mostra uma locomotiva diesel-elétrica em corte e a tabela 4 mostra a lista dos componentes de uma locomotiva diesel eléctrica.

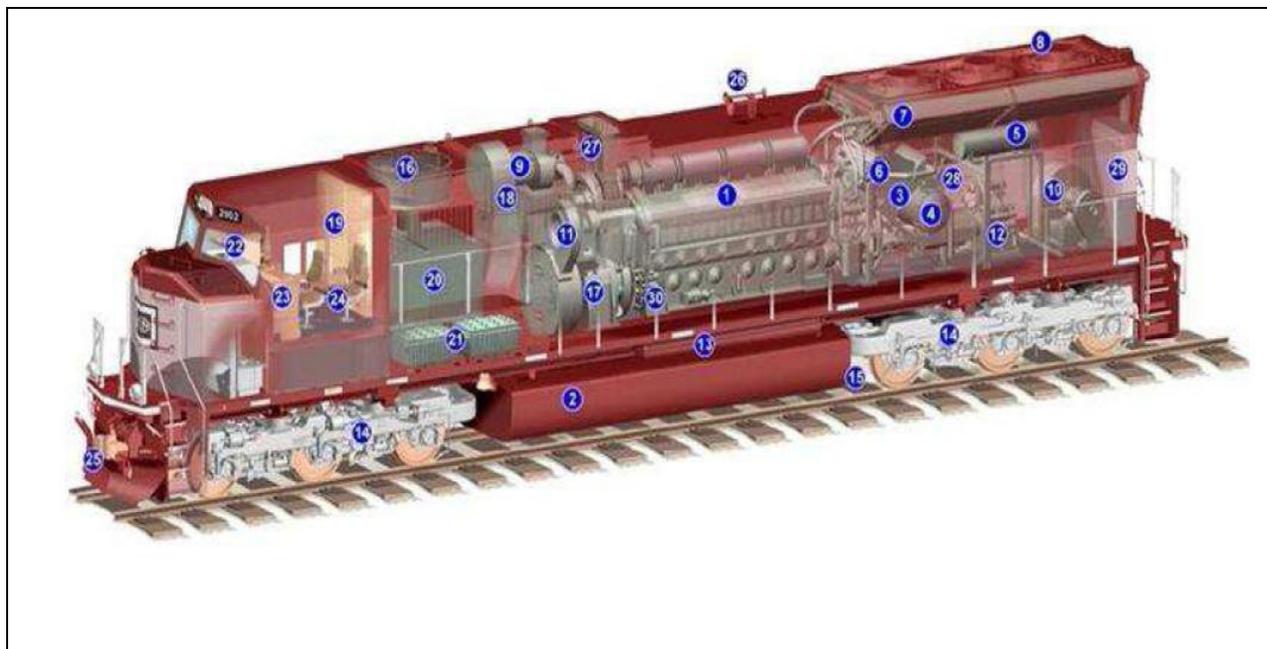


Figura 6: locomotiva diesel-elétrica em corte

Fonte: (Borba 2012)

Tabela 4: Componentes de uma locomotiva diésel eléctrica

<b>Componentes de uma locomotiva Diesel Eléctrica</b>			
1	Motor diesel	16	Freio dinâmico
2.	Tanque de combustível	17	Gerador de tracção
3	Resfriador de óleo lubrificante	18	Filtro de inércia
4	Filtro de óleo lubrificante	19	Armário eléctrico 1
5	Reservatório auxiliar de água	20	Armário eléctrico 2
6	Reservatório da água de resfriamento	21	Baterias
7	Radiadores	22	Console do maquinista
8	Ventiladores do sistema de resfriamento	23	Console do auxiliar
9	Soprador do truque 1	24	Poltronas
10	Soprador do truque 2	25	Engates
11	Soprador do gerador	26	Buzina
12	Compressor de ar	27	Escapamento do motor diesel
13	Reservatório de ar	28	Filtro primário de combustível
14	Bogie	29	Reservatório de areia
15	Motor de tracção	30	Motores de partida

### 3.3.2. Os bogies

Os bogies constituem um dos principais elementos da locomotiva e têm a função de suportar o peso da locomotiva e fornecer os meios para a transmissão da potência aos rodados. São projectados a fim de suportar as tensões resultantes dos choques de operação, produzidos pelas irregularidades da via e de outras condições adversas encontradas durante o serviço (Borba, 2012).

A estrutura do bogie é projectada no sentido de absorver e isolar os choques, de modo a que eles não sejam transmitidos para a plataforma da locomotiva e aos equipamentos montados sobre ela. Por conseguinte, o bogie das locomotivas apresenta maior complexidade estrutural em relação ao dos veículos rebocados.



Figura 7: Bogies do tipo C

### 3.3.3. Descrição do Sistema de Suspensão da Locomotiva C30-ACi

As funções globais do sistema de suspensão dos bogies têm a finalidade de proporcionar uma boa aderência dos rodados aos trilhos, uma utilização eficiente das forças de tracção e um isolamento apropriado do equipamento e do pessoal de operação, dos choques e das vibrações provocadas pelos trilhos.

O sistema de suspensão, na maioria dos bogies, consiste de dois tipos (Borba, 2012):

- **Suspensão primária** - situada entre a estrutura do bogie e as caixas de rolamento nas extremidades dos eixos dos rodados;
- **Suspensão secundária** - situada entre a travessa flutuante e a estrutura do bogie.

Tipicamente, as suspensões dos bogies das locomotivas, primárias ou secundárias, ou ambas, utilizam como elementos de suspensão conjuntos ou combinações de:

- Molas helicoidais de aço;
- Molas elípticas de aço;
- Molas de borracha paralela (coxins);
- Molas de borracha do —tipo V.

Devido ao papel crítico que o sistema de suspensão cumpre dentro do desempenho global e na segurança da locomotiva, a manutenção adequada dos componentes de suspensão é vital.

### **3.3.3.1. Suspensão primária**

As caixas de rolamento, montadas nas pontas dos eixos dos rodados, têm seu movimento relativo ao bogie limitado pelos pedestais laterais, aos quais estão aparafusadas as placas de desgaste, chamadas de —telhas, que guiam o movimento vertical das caixas de rolamento.

Na base dos pedestais laterais é aparafusada uma placa de aço que limita o deslocamento vertical inferior da caixa de rolamentos entre os pedestais, e evita que as bases dos pedestais se distanciem entre si, provocando folgas entre as caixas de rolamento e as telhas (Borba,2012).

Todo o peso da locomotiva é transferido das estruturas dos bogies para os eixos dos rodados através de um conjunto de molas helicoidais, fabricadas conforme a Norma AAR M114, que se apoia directamente sobre as caixas de rolamento (Borba,2012). A Figura 8 mostra os elementos de suspensão primária (Mola helicoidal).



Figura 8: Elementos de suspensão primária (Mola helicoidal).

Em muitos casos, utiliza-se de conjuntos múltiplos de molas helicoidais. As molas helicoidais, geralmente, permitem grandes distâncias de deformação elástica que tendem a igualar as cargas nas rodas e a melhorar as condições de viagem em trilhos irregulares. A fim de realizar uma operação segura, alcançar aderência óptima e níveis de esforço de tracção elevado é importante manterem-se as cargas sobre os eixos razoavelmente equalizadas. Para que isso seja alcançado é necessário que num mesmo rodeiro, num mesmo bogie e numa mesma locomotiva, sejam utilizadas:

- Rodas com tolerância entre os diâmetros conforme o especificado pelo fabricante da locomotiva;
- Molas com coeficiente de elasticidade de uma mesma classificação.

Além das molas helicoidais, na suspensão primária podem ser utilizados amortecedores telescópicos hidráulicos, cuja função é de absorver as oscilações provocadas pelos movimentos parasitas da estrutura da locomotiva. A figura 9 mostra os Amortecedores telescópicos.

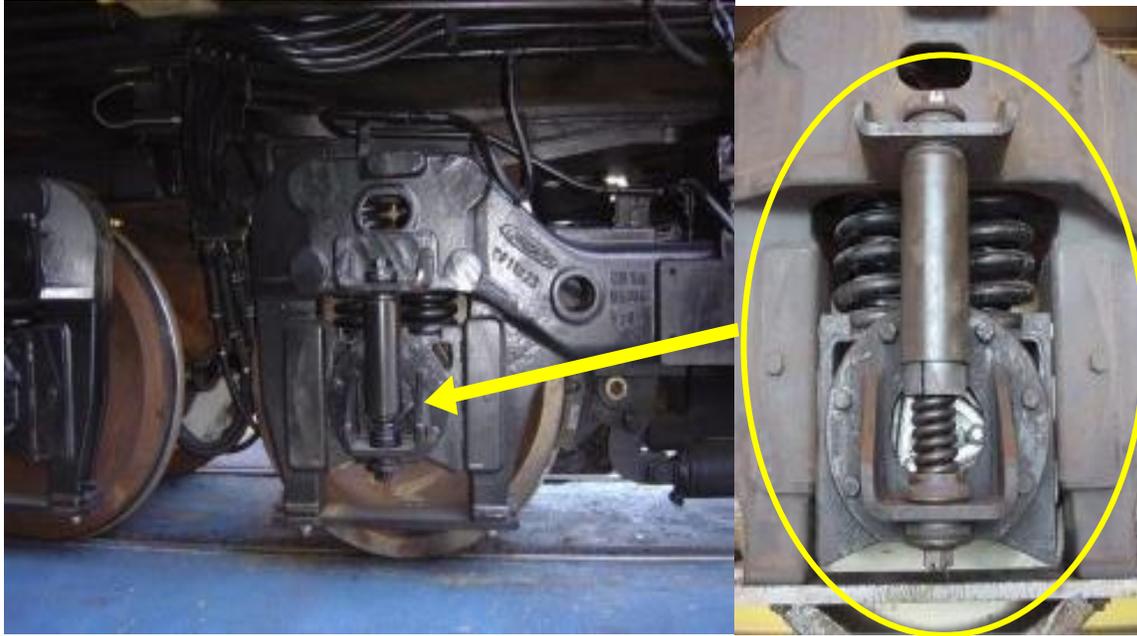


Figura 9: amortecedores telescópicos

Eventualmente, alguns bogies usam molas de borracha do tipo em —V, na suspensão primária, entre a estrutura do truque e a caixa de mancal do eixo.

### 3.3.3.2. Suspensão secundária

A interligação do bolster (travessa flutuante) à estrutura do truque pode ser realizada através de molas helicoidais de aço ou de coxins de borracha e aço, os quais absorvem boa parte dos impactos provenientes da estrutura do truque para a plataforma e os choques devido aos movimentos verticais da carroceria absorvem os choques devido aos movimentos verticais da carroceria e do bogie. Além disso, as molas produzem amortecimento vertical na suspensão. Os movimentos do bolster em relação à estrutura do truque são limitados pelos ampara- balanço. As molas elípticas são para suspensão secundária. A figura 10 mostra as Molas helicoidais e coxins de borracha e aço.



Figura 10: Molas helicoidais e coxins de borracha e aço.

### 3.4. Bogies, plataforma e aparelhos de choque tração

Em suma o bogie é responsável por suportar o peso da locomotiva e transferir movimento a mesma. É constituído basicamente de peças fundidas que são as laterais esquerda e direita e a travessa flutuante com apoio central, molas, caixas de rolamentos, rodeiros, motores de tração, amortecedores, coxins, caixas de engrenagem e timonaria de freio com ilustra a figura11.

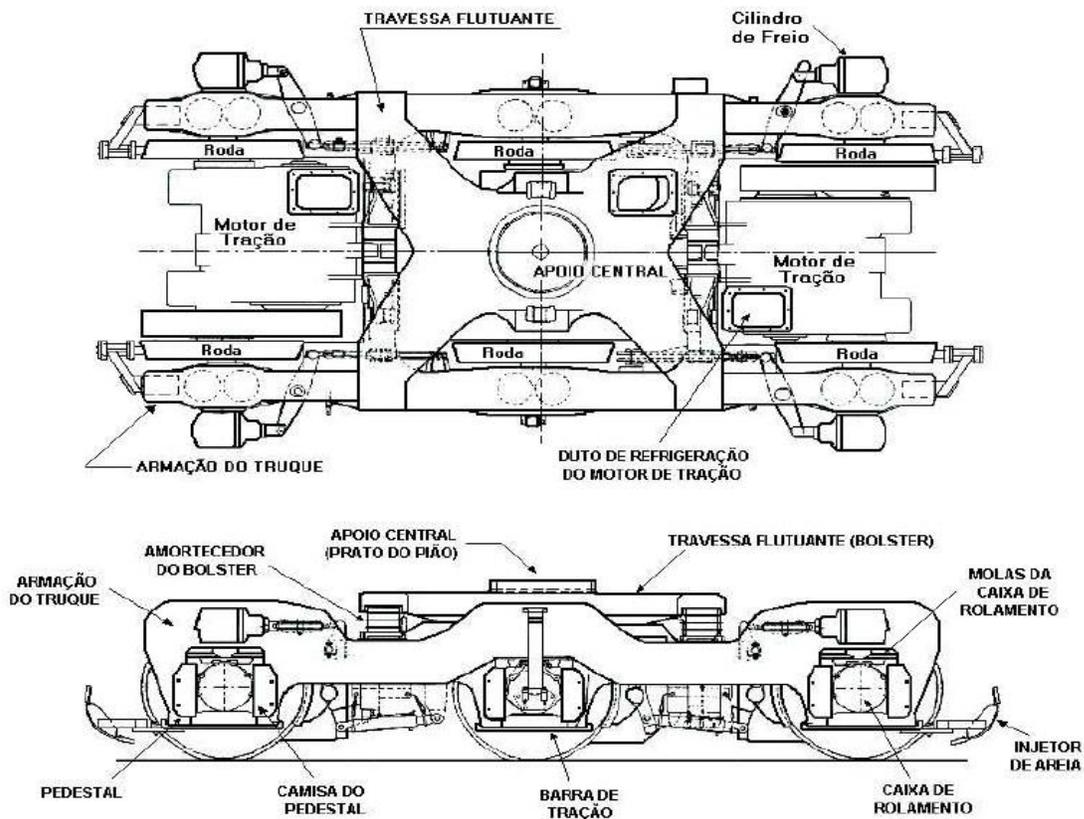


Figura 11: Vista superior e lateral de um bogie.

(Fonte: curso Material Rodante)

### 3.4. Principais avarias do Bogie

De acordo com CFM (2016), as avarias dos Bogies das locomotivas são devidas à várias causas. Por um lado, as falhas estão associadas às irregularidades da linha, mas por outro lado são decorrentes de práticas de manutenção ineficientes, conforme se descreve na Tabela 5.

Tabela 5: principais avarias do bogie

Número de ordem	Tipo de avaria	Origem ou causa	Modo de reparação
	1	2	3
1.	Covas nos rodados	Cilindro de vácuo avariado e desapertado manobrar o veículo com os freios apertados	Reparação do cilindro
2.	Cintas leves	Mau torneamento, circulação com freios apertados	Substituição da cinta ou enchimento da Pina para novo torneamento
3.	Moentes gripadas	Moente riscado; Falta de lubrificação; Excesso de carga; Excesso de velocidade; Rolamento fora do lugar	Torneamento do moente e a substituição de rolamentos
4.	Mola partida	Excesso e má distribuição de carga Irregularidade de via, embates bruscos	Substituição da mola
5.	Molas gastas	Excesso de carga, defeito de material; Fadiga de material	Substituição das molas ou sua recuperação no caso de elípticos
6.	Amortecedores	Fadiga de material	Substituir
7.	Bogie partido	Irregularidade da via, embates violentos, descarrilamento	Soldadura, desempenho e substituição em de parte
8.	Travessa dançante partida	Excesso de carga Embates violentos	Soldadura e substituição em caso de avaria grossa
9.	Guias da travessa dançante avariada	Desgaste	Enchimento e rectificação
10.	Prato de pivô	Embates fortes Rebites leves	Recuperar com soldadura se for grave substituir
11.	Travessa fixa partida	Embates violentos	Soldadura ou substituição em caso grave
12.	Bogie torcido	Acidentes e descarrilamentos	Desempenar
13.	Rolamento gripado	Excesso de carga, Falta de Lubrificação, Vedante gasto	Substituição do rolamento
14.	Adaptador rachado, deslocados ou gasto	Má distribuição de carga, má colocação	Substituição do adaptador
15.	Rodados defeituosos	Todos os defeitos dos rodados	Substituir o rodado
16.	Cavilhas, troços parafusos, anilhas em falta	Degolados, inexistentes ou soltos	Aplicar ou reapertar
17.	Apoio lateral (almofadas) partido ou inexistente	Falta de folgas	Aplicar novas

Fonte: CFM (2016)

### 3.5. Molas

As molas são peças com capacidade de armazenar energia potencial ao serem deformadas e restituí-la ao serem descarregadas. Todos os corpos elásticos têm esta propriedade, mas as molas mais usadas são feitas de materiais selecionados e têm formas especiais que lhes conferem a máxima utilização da capacidade de armazenagem e restituição de energia. (Siteo, 2010)

As molas são utilizadas nas máquinas para exercer força (como por exemplo molas de actuação de válvulas de motores de explosão e molas de balanças), para fornecer flexibilidade (como por exemplo molas de uniões flexíveis de veios e molas dos discos das embraiagens de automóveis) e para armazenar ou absorver energia (como por exemplo molas de mecanismos de relógio e molas de suspensões de máquinas ou de veículos).

#### 3.5.1. Molas Helicoidais de compressão

As molas helicoidais são constituídas por um arame enrolado formando uma hélice, geralmente cilíndrica, com passo constante. a figura 12, ilustra a mola helicoidais de compressão e seus principais parâmetros.

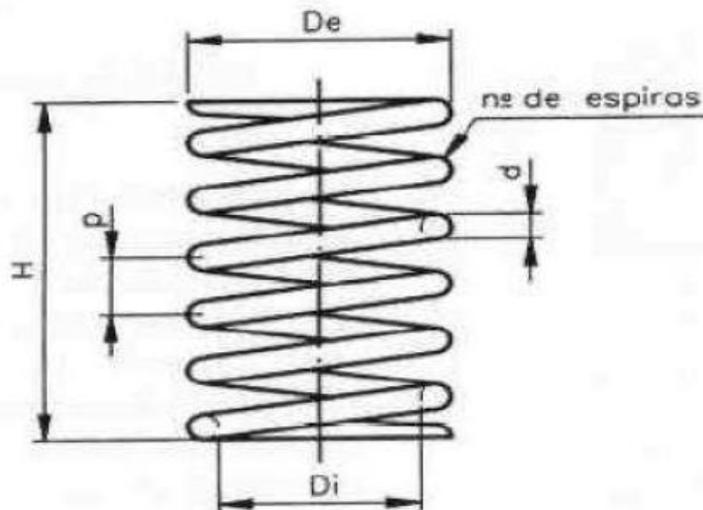


Figura 12: Características de uma mola helicoidal.

### 3.5.2. Principais parâmetros geométricos das molas helicoidais.

A baixo apresenta-se os parâmetros da mola helicoidal de compressão:

d - Diâmetro do arame da mola;

$D_e$  - Diâmetro externo da mola;

$D_i$  - Diâmetro interno da mola;

$D_m$  - Diâmetro médio da mola (diâmetro da hélice);

c - Índice da mola;

p - Passo da hélice da mola;

H - altura/comprimento total da mola livre (L);

$N_t$  - número total de espiras da mola;

$N_a$  - número total de espiras activas;

$\delta$  - deformação da mola;

$\alpha$  - ângulo de subida da hélice.

### 3.5.3. Sequencia de cálculos da tensão das molas helicoidais de compressão

As molas helicoidais são constituídas por um arame enrolado formando uma hélice, geralmente cilíndrica, com passo constante.

Quando aplicado uma força qualquer em uma mola, todas as partes do arame deste material ficarão sujeitos a um esforço transversal direto, F, e a um  $\tau_m$  momento de torção, segundo a Equação.

$$T = \frac{F \times D_m}{2}$$

Sendo que diâmetro médio:

$$D_m = \frac{D_e + D_i}{2}$$

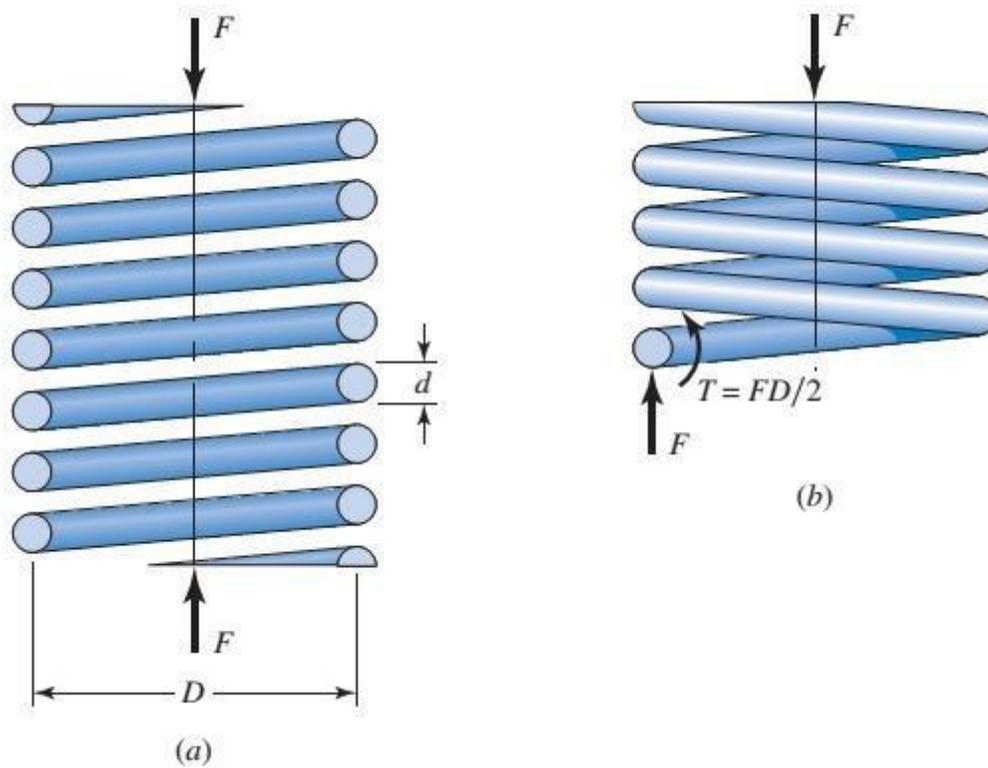
A figura representa os esforços dos quais uma mola helicoidal de compressão está sujeita ao ser aplicada uma carga  $F$  e tem se.

Momento torsor:  $T = \frac{F \times D_m}{2}$

Esforço cortante:  $F$

Tensões tangenciais:  $\tau_F = \frac{F}{A}$

$\tau_T = \frac{F \times D}{2 \times J}$



13: Figura 13: (a) diagrama de corpo livre mostrando que o fio está sujeito a um cisalhamento direto e outro de torção. (b) Mola helicoidal carregada longitudinalmente.

Fonte: (SHIGLEY, 2007)

A tensão máxima na mola segue a Equação.

$$\tau_m = \tau_T + \tau_F = \left( \frac{F \times D}{2 \times J} + \frac{F}{A} \right) \times \cos \alpha$$

A tensão tangencial máxima surge na parte interior das espiras, com valor  $\tau_T + \tau_F$ . Considerando a inclinação das espiras (6.....15<sup>0</sup>):

$$\text{Sendo } \cos \alpha \approx 1 \rightarrow \tau_m = \frac{T \times r_m}{J} + \frac{F}{A}$$

$$\text{E, } \tau_T \gg \tau_F \rightarrow \tau_m = \tau_T \times K_b$$

Onde que momento de inércia é dado pela Equação:

$$J = \frac{\pi \times d^4}{32}$$

Deve-se também adicionar o fator corretivo de curvatura  $K_b$ , sendo assim a tensão máxima na mola será calculada através da Equação:

$$\tau_m = K_b \times \left( \frac{T \times r_m}{J} \right)$$

Para carregamentos estáticos, as tensões voltadas à fadiga podem ser ignoradas por causa do enrijecimento de deformação com a primeira aplicação da carga, portanto, o coeficiente de curvatura irá alterar, sendo calculado pela Equação:

$$K_b = \frac{4 \times c + 2}{4 \times c - 3}$$

O índice da mola geralmente está entre quatro e doze para molas helicoidais de compressão para serviço estático, podendo ser calculado pela Equação:

$$c = \frac{D_m}{d}$$

Para obter a tensão de cisalhamento, utiliza-se a Equação:

$$\tau = K_b \times \frac{8 \times F \times D_m}{\pi \times d^3}$$

### 3.5.4. Cálculo da deformação

Para o cálculo da deformação da mola, tem-se a Equação.

$$\delta = \frac{8 \times F \times D_m^3}{G \times d^4} \times N_a$$

## 3.6. ANÁLISE ESTÁTICA

Utiliza-se a análise estática estrutural para determinar os deslocamentos, tensões, deformações e forças causada por cargas que não sofrem significativas influências dos efeitos

gerados pela inércia e pelo amortecimento, ou seja, sob condições de cargas estáticas em uma determinada estrutura. As condições de cargas e respostas são estáveis. (ANSYS, 2015)

A análise estática de estruturas tem por objetivo principal quantificar a magnitude dos esforços internos e dos deslocamentos que se manifestam em qualquer sistema estrutural, quando o mesmo é submetido a um carregamento arbitrário, desprezando-se o efeito das forças de amortecimento e das forças de inércia.

Quatro critérios de falha para casos estáticos são muitos utilizados na engenharia: A teoria de Cisalhamento Máximo; Critério de von Mises; Critério de Coulomb-Möhr; e Critério de Falha de Möhr-modificado; sendo as duas primeiras teorias para materiais dúcteis e as duas últimas teorias para materiais frágeis. (ANSYS, 2015)

De forma sumaria a análise estática diz que:

A condição para que a mola resista é de que o limite de escoamento do material do arame da mola seja igual ou superior a tensão de cisalhamento calculada, vide na tabela 7.

$$\tau \leq [\tau]$$

E a condição para que a mola resista a deformação é de que o seu alongamento relativo deve estar no intervalo recomendado ao material, vide na tabela 7.

### **3.7. ANALISE DINÂMICA EM MOLAS**

Quando as cargas na mola são dinâmicas (variam com o tempo), uma situação de fadiga existe na mola.

#### **3.7.1. Análise de Fadiga**

Para prever falhas estruturais causadas pela ação de cargas dinâmicas ou tensões repetidas, variáveis, alternantes ou flutuantes, que são impostas a estrutura em um longo período de tempo e com um grande número de ciclos, é feita uma análise de fadiga. Geralmente, essas cargas ou tensões possuem valores baixos, na maioria dos casos inferiores a resistência máxima que o material resiste ou até inferior a tensão de escoamento do material. As falhas por fadiga são extremamente perigosas por não darem avisos prévios, como ocorre em falhas por carregamento

estático, e em muitos casos é muito difícil de se prever por causa das condições impostas aos componentes estruturais. (SHIGLEY, 2011).

Há um conjunto de variáveis imprescindíveis para que se dê a ruptura por fadiga, são elas: tensão principal máxima suficientemente elevada; variação ou flutuação da tensão aplicada suficientemente grande e número de ciclos de tensão aplicada suficientemente grandes. (BRANCO, 2006).

### 3.7.2. Análise do carregamento operacional

As forças que atuaram diretamente na mola serão dadas, nessa análise funcionará da mesma forma onde os valores de força máxima  $F_{max}$  e força inicial ou mínima  $F_{min}$ . A partir dessas forças pode-se calcular as componentes de força alternada  $F_a$  e força média  $F_m$ . A literatura recomenda que a razão  $\frac{F_{min}}{F_{max}} < 0.8$ .

$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$$
$$F_a = \frac{|F_{max} - F_{min}|}{2}$$

### 3.7.3. Tensões

Com o conhecimento de todas as forças e suas componentes as tensões podem ser calculadas, como a tensão inicial ( $\tau_i$ ), tensão média ( $\tau_m$ ) e tensão alternada ( $\tau_a$ ).

$$\tau_a = K_s \times \frac{8 \times F_i \times D_m}{\pi \times d^3}$$
$$\tau_a = K_s \times \frac{8 \times F_a \times D_m}{\pi \times d^3}$$
$$\tau_m = K_w \times \frac{8 \times F_m \times D_m}{\pi \times d^3}$$

### 3.7.4. Coeficientes de carregamento dinâmico

Para carregamentos dinâmicos os coeficientes  $K_s$  e  $K_w$  serão calculados pelas Equações seguintes:

$$K_s = \frac{2 \times c + 1}{2 \times c}$$

$$K_w = \frac{4 \times c + 1}{4 \times c - 4} + \frac{0.615}{c}$$

### 3.7.5. Resistência ao escoamento sob torção

Resistência ao escoamento sob torção ( $S_{su}$ ) de fios de molas varia com o tipo de material, para matérias como aço carbono endurecido e revenido e aço de baixa liga, será adotado molas ajustadas, então terá 67% do limite de resistência a tracção ( $S_{ut}$ ):

$$S_{su} = 0,67 \times S_{ut}$$

### 3.7.6. Limite de resistência à fadiga torsional para carregamento repetido

As correspondentes componentes de resistência à fadiga para vida infinita estimadas empiricamente por Zimmerli são dadas por:

Sem jateamento de granalha:

$$S_{sa} = 241 \text{ MPa} \text{ e } S_{sm} = 379 \text{ MPa}$$

Com jateamento de granalha:

$$S_{sa} = 398 \text{ MPa} \text{ e } S_{sm} = 534 \text{ MPa}$$

O jateamento de granalha pode aumentar a resistência à fadiga torsional em até 20% de molas carregadas dinamicamente.

Como já explicado, será adotado a condição de molas não jateadas, então será usado o valor de:

$$S_{sa} = 241 \text{ MPa} \text{ e } S_{sm} = 379 \text{ MPa}$$

### 3.7.7. Limite de resistência à fadiga torsional para carregamento alternado

Para poder usar o critério de Goodman é preciso converter o valor de limite de resistência á fadiga torsional de carregamento repetido para carregamento alternado ( $S_{es}$ ), essa conversão é feita da seguinte forma:



Logo, o Factor de Segurança se resume à:

$$N_{fs} = \frac{S_{sa.go}}{\tau_a}$$

Uma mola pode ser considerada segura segundo o critério de falha por fadiga torsional se  $N_{fs}$  for maior que 1, porém não é recomendado usar um valor muito acima disto, por volta de 1,3 e 1,5 é o mais recomendado.

### **3.8. MODELAÇÃO COMPUTACIONAL**

Nos últimos anos assistiu-se a uma aceitação generalizada da importância da utilização do computador em investigação e projecto. Em particular, o Método de Elementos Finitos (M.E.F.) é uma ferramenta poderosa e de rigor comprovado pelo que se torna incontornável a sua utilização em grande parte dos projectos em engenharia, permitindo substituir ou reduzir o recurso ao método dos modelos reduzidos ou processos de tentativa e erro com protótipos.

#### **3.8.1. Método de Elementos Finitos**

O programa Autodesk Inventor de elementos finitos foi utilizado para determinar as tensões na mola, tendo-se procedido posteriormente à determinação estimativa da vida em fadiga da mola, seguindo a metodologia apresenta anteriormente.

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta numérico computacional utilizada para a solução aproximada de equações diferenciais. Este método resolve equações diferenciais parciais, onde que são criadas fórmulas fracas para obtenção de um resultado final aproximado do resultado real (Fish, 2007).

O MEF baseia-se na subdivisão de sistemas físicos discretos ou contínuos. O domínio físico é dividido em subdomínios a que se dá o nome de elementos finitos. Cada elemento finito é

definido por um número determinado de nós que são ligados entre si para que o elemento seja fechado ou seja o que defina uma fronteira (Arcanjo,2008).

Adicionalmente, o MEF é utilizado para resolver problemas de engenharia, tais como comportamentos em sistemas elétricos, mecânicos e térmicos (Bettazzi,2003), o que justificou o seu uso neste trabalho.

## CAPÍTULO IV. METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

### 4.1. Abordagem da investigação

Para elaboração do presente trabalho foi necessário fazer-se pesquisas, consultas a manuais do assunto em causa tanto como consultas a especialistas e técnicos da área.

Assim, de forma concreta, para a execução de cada objectivo específico, usar-se-á bases lógicas da investigação, a pesquisa será do tipo hipotético-dedutivo uma vez que se pretende trabalhar sobre um campo complexo, como se descreve a seguir:

- Descrever o sistema de suspensão das locomotivas – será mediante a pesquisa bibliográfica e documental, que consistirá na consulta dos catálogos e dos esquemas cinemáticos e mecânicos das locomotivas com vista a determinar as suas especificações em termos de suspensão.
- Proceder com a análise da mola através da análise analítica – este objectivo será materializado mediante o uso de equações disponíveis em manuais.
- Proceder com a modelagem da mola através do modelo analíticos e numéricos – este objectivo será materializado mediante a simulação de um protótipo da mola no programa informático Autodesk Inventor® cuja análise permitira determinar os pontos críticos da mola durante o funcionamento.
- Propor práticas voltadas para a confiabilidade e aumento da vida útil das molas – este objectivo será alcançado através da sugestão de um elemento ou forma de minimizar a concentração de tensões.

### 4.2. Variáveis de investigação

Para esta investigação foram definidas as seguintes variáveis:

**Independente:** Falhas das molas;

**Dependentes:** Confiabilidade operacional;

## **CAPÍTULO V. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Neste capítulo, será feita apresentação do modelo analítico da mola que está sendo utilizada como objecto de estudo, todavia antes de realizar tal atividade, necessita-se de alguns dados em adicional.

No item 5.1, será apresentada a locomotiva da qual pode ser encontrado a mola que está sendo analisada.

Através do item 5.2, serão revisadas todas as características do material da mola, juntamente com as cotas da mesma.

Em seguida, no item 5.3, será realizada a análise analítica em si, utilizando equações que auxiliem a obtenção da tensão.

No item 5.4, será realizada a análise analítica para a deformação na mola.

No item 5.5, será feita a análise dinâmica da mola pela análise analítica calcula se o factor de segurança a fadiga,

No item 5.6, Uso de Método de Elementos Finitos (MEF) que é uma ferramenta numérico computacional utilizada para a solução aproximada de equações diferenciais.

Por final, no item 5.7, serão analisados os resultados obtidos com dados do material e com um modelo real da mola.

### **5.1. Locomotiva C30-ACi**

A locomotiva C30- ACi fabricada pela GE, podendo ser encontrada operando os CFM-Sul e Centro do país. E abaixo tem se o seu aspecto visual e da sua mola em analise.



Figura 15: Vista lateral da locomotiva C30-ACi.

Fonte: (Autor)

Modelo real da mola externa da caixa de rolamentos da locomotiva C30-ACi.



Figura 16: Molas da suspensão primária locomotiva C30-ACi.

Fonte: (Autor)

## **5.2. Apresentação de todas as características do material da mola, juntamente com as cotas da mesma**

A mola em estudo está localizada na caixa de rolamentos, que foi apresentada na Figura 24, também pode ser observada no anexo, DEMA- EP-2022-DP001.

Tabela 6: Características da Mola a analisar

<b>Características Geométricas</b>			
<b>Ord.</b>	<b>Características</b>	<b>Valor</b>	<b>Observações</b>
1	Diâmetro externo ( <b>De</b> ), mm	200	Medido
2	Diâmetro interno ( <b>Di</b> ), mm	140	Medido
3	Comprimento Livre ( <b>Lo</b> ), mm	490	Medido
4	Passo ( <b>p</b> ), mm	30	Ficha técnica (dado)
5	Diâmetro do arame ( <b>d</b> ), mm	30	Medido
6	Numero de espiras activas ( $N_a$ )	7	Ficha técnica (dado)
7	Material da Mola	SAE 5160	Ficha técnica (dado)
8	Tipo de esforço exercido	Compressão	Ficha técnica (dado)
9	Carga por eixo da Mola ( <b>tonelada/eixo</b> )	15	Ficha técnica (dado)
10	Tipo de análise a ser feita	Estatica	Ficha técnica (dado)

Fonte: (Autor)

A locomotiva tem 120 toneladas, para se fazer o estudo deve de excluir o peso dos 6 rodados, 6 motores de tracção, e outros componentes cujo peso não é descarregado na mola, assim ficamos com 90 toneladas que são distribuídas pelos 6 eixos, 48 molas sendo 24 internas e 24 externas oque nos leva a ter o peso de 1.875 toneladas por mola.

Pode-se observar através da Figura 5.2, que a mola possui uma altura livre de 490,00 mm, altura de trabalho de 385,00 mm, diâmetro externo 200,00mm, diâmetro interno 140,00 mm, o diâmetro do arame é 30,00 mm e passo de 30,00 mm, uma vez que esta medida é dada através dos centros de dois arames, por fim, ao aplicar uma carga de 18392. N, a mola devera deslocar no máximo ate 23,9% da sua altura livre.

O material utilizado na fabricação desta mola é o SAE 5160, tendo um módulo de elasticidade transversal de 83,00 GPa.

Tabela 7: Características do material SAE 5160

Condição	Limite de Escoamento [MPa]	Limite de Resistência [MPa]	Alongamento [%]	Dureza Rockwell [HRc]
Temperado e Revenido	672 - 758	786-832	22,7-23,9	41-45

Fonte: (COUTO, 2007)

## 5.3. ANALISE ESTÁTICA

### 5.3.1. Sequencia do calculo da Tensão

Sendo que **diâmetro médio**:

$$D_m = \frac{D_e + D_i}{2}$$

Substituindo os dados tem-se:

$$D_m = \frac{200 + 140}{2} = 170 \text{ mm}$$

O **índice de mola** será:

$$c = \frac{D_m}{d}$$

$$c = \frac{170}{30} = 5,6667$$

O **coeficiente de carga estática** dada por:

$$K_b = \frac{4 \times c + 2}{4 \times c - 3}$$

$$K_b = \frac{4 \times 5,6667 + 2}{4 \times 5,6667 - 3} = 1,2542$$

A **tensão** é dada por:

$$\tau = K_b \times \frac{8 \times F \times D}{\pi \times d^3}$$

$$\tau = 1,2542 \times \frac{8 \times 18393.75 \times 170 \times 10^{-3}}{\pi \times (30 \times 10^{-3})^3}$$

Resultando em:

$$\tau = 370 \text{ MPa}$$

$$\tau \leq [\tau] \rightarrow 370 \text{ MPa} < (672 - 758) \text{ MPa}$$

### 5.3.2. Cálculo da deformação

Para o cálculo da deformação da mola, tem-se:

$$\delta = \frac{8 \times F \times D_m^3}{G \times d^4} \times N_a$$

$$\delta = \frac{8 \times 18393.75 \times (170 \times 10^{-3})^3}{83 \times 10^9 \times (30 \times 10^{-3})^4} \times 7 = 0.07525 \text{ m}$$

$$= 75.25 \text{ mm}$$

## 5.5. ANALISE DINÂMICA

### 5.5.1. Resistência ao escoamento sob torção

A resistência máxima cisalhante pode ser calculada pela fórmula a baixo, da tabela 7 o limite de resistência a tração é  $S_{ut}=809 \text{ MPa}$  :

$$S_{su} = 0,67 \times S_{ut}$$

$$S_{su} = 0.67 \times 809$$

$$S_{su} = 542 \text{ MPa}$$

### 5.5.2. Análise do carregamento operacional

A Força mínima é considerada nula  $F_{min} = 0$ ,  $F_{max} = 18393.75 \text{ N}$ ,  $F_{min}/F_{max} <$

0.8, então  $F_a$  a força alternada e  $F_m$  a força média, encontramos os seguintes valores:

$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \qquad F_a = \frac{|F_{max} - F_{min}|}{2}$$

$$F_m = \frac{18393.75 + 0}{2} \qquad F_a = \frac{|18393.75 - 0|}{2}$$

$$F_m = 9196.875 \text{ N} \qquad F_a = 9196.875 \text{ N}$$

### 5.5.3. Coeficientes de carregamento dinâmico

Os coeficientes  $K_s$  e  $K_w$  serão:

$$K_s = \frac{2 \times c + 1}{2 \times c} \qquad K_w = \frac{4 \times c + 1}{4 \times c - 4} + \frac{0.615}{c}$$

$$K_s = \frac{2 \times 5,6667 + 1}{2 \times 5,6667} \qquad K_w = \frac{4 \times 5,6667 + 1}{4 \times 5,6667 - 4} + \frac{0.615}{5,6667}$$

$$K_s = 1.0882 \qquad K_w = 1.3764$$

### 5.5.4. Tensões

Com o conhecimento de todas as forças e suas componentes as tensões podem ser calculadas, como a tensão inicial ( $\tau_i$ ), tensão média ( $\tau_m$ ) e tensão alternada ( $\tau_a$ ).

$$\tau_i = K_s \times \frac{8 \times F_{min} \times D_m}{\pi \times d^3}$$

$$\tau_i = 0$$

$$\tau_a = K_w \times \frac{8 \times F_a \times D_m}{\pi \times d^3}$$

$$\tau_a = 1.3764 \times \frac{8 \times 9196.875 \times 170 \times 10^{-3}}{\pi \times (30 \times 10^{-3})^3}$$

$$\tau_a = 202.96 \text{ MPa}$$

e

$$\tau_m = K_s \times \frac{8 \times F_m \times D_m}{\pi \times d^3}$$

$$\tau_m = 1.0882 \times \frac{8 \times 9196.875 \times 170 \times 10^{-3}}{\pi \times (30 \times 10^{-3})^3}$$

$$\tau_m = 160.46 \text{ MPa}$$

### 5.5.5. Limite de resistência à fadiga torsional para carregamento repetido

Os valores de  $S_{sa}$  e  $S_{sm}$  para molas sem jateamento de granalha são:

$$S_{sa}=241\text{MPa e } S_{sm}=379\text{MPa}$$

O fator de segurança pode ser calculado da seguinte forma:

$$n_f = \frac{S_{sa}}{\tau_a}$$

$$n_f = \frac{241}{202.96}$$

$$n_f = \mathbf{1.1874}$$

A ordenada de intersecção de Goodman para os dados de Zimmerli é:

$$S_{se\ go} = \frac{S_{sa}}{1 - \frac{S_{sm}}{S_{su}}}$$

$$S_{se\ go} = \frac{241}{1 - \frac{379}{542}}$$

$$S_{se\ go} = 801.4 \text{ MPa}$$

O declive da linha de carga é dado por:

$$m_l = \frac{\tau_a}{\tau_m}$$

$$m_l = \frac{202.96}{160.46}$$

$$m_l = 1.2649$$

A abcissa de intersecção de Goodman para os dados de Zimmerli é:

$$S_{sa\ go} = \frac{m_l \times S_{se} \times S_{su}}{m_l \times S_{su} + S_{se}}$$

$$S_{sa\ go} = \frac{1.2649 \times 801 \times 542}{1.2649 \times 542 + 801}$$

$$S_{sa\ go} = 369.49 \text{ MPa}$$

### 5.5.6. COEFICIENTE DE SEGURANÇA PARA FALHA POR FADIGA TORCIONAL

$$N_{fs} = \frac{S_{sa\ go}}{\tau_a}$$

$$N_{fs} = \frac{369.49}{202.96}$$

$$N_{fs} = \mathbf{1.82}$$

E de forma gráfica no diagrama de Goodman tem-se.

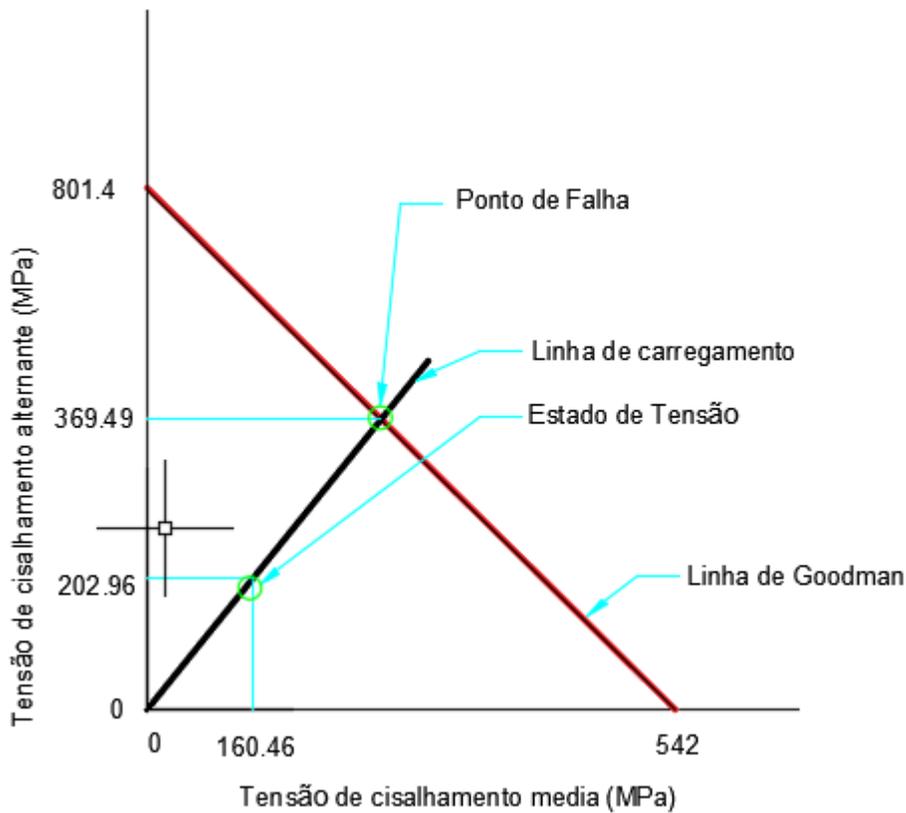


Figura 17: Diagrama de Goodman modificado mostrando os dados diagramados.

## 5.6. Aplicação do MEF

A resolução de um problema em elementos finitos consiste em cinco etapas, dentre elas (FISH, 2007):

- Pré-processamento;
- Formulação do elemento;
- Obtenção das equações;
- Resolução das equações;
- Pós-processamento.

A primeira etapa irá dividir o problema em diversos elementos finitos, ou seja, irá fragmentar o problema em questão.

Já a segunda etapa irá desenvolver equações para cada elemento de tal forma que seja possível visualizar o que está ocorrendo com todas as partes do objeto em análise.

Em seguida a terceira etapa irá obter as equações das quais foram criadas na etapa anterior.

A etapa quatro fará a resolução das diversas equações obtidas, onde que por final o resultado obtido poderá ser analisado na etapa cinco.

### 5.6.1. Análise numérica

Geração e análise da qualidade da malha foi utilizado o software AutoCAD Inventor, versão 2018, e taxa de refinamento 1, como pode ser visto na figura 5:

### 5.6.2. Geração do modelo físico

As variáveis inseridas no software seguem as cotas do Anexo A, onde que também podem ser observadas através da Tabela 8.

Tabela 8: variáveis inseridas no software

Variáveis	Simbolos	Valores	Unidades
Diâmetro externo	$D_e$	200	mm
Diâmetro interno	$D_i$	140	mm
Comprimento Livre	$L_o$	490	mm
Passo	$p$	30	mm
Diâmetro do arame	$d$	30	mm
Modulo de Elasticidade	$E$	215,8	GPa
Modulo de Elasticidade Transversal	$G$	83	GPa
Coeficiente de Poison	$\nu$	0.3	
Força aplicada	$F$	18393.75	N

Fonte: (Autor)

Com os dados da Tabela 8, gerou se um modelo físico da mola, conforme segue na Figura 18

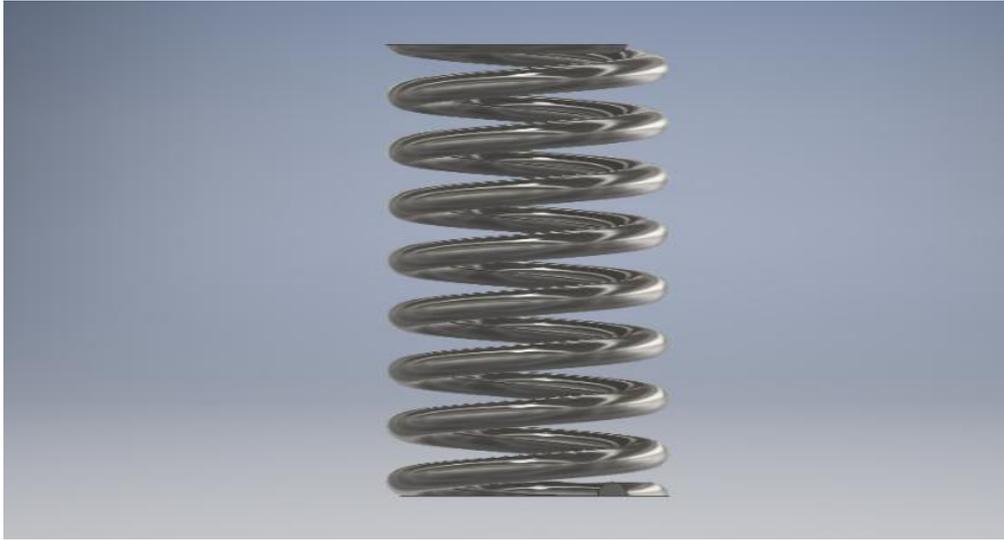


Figura 18: Modelo físico da mola gerado no software.

Fonte: (Autor)

### **5.6.3. Escolha das propriedades do material**

As propriedades do material foram mantidas as mesmas das já mencionadas nos capítulos anteriores de tal forma que se pode observar tais dados adicionados no software, através da Figura 19.

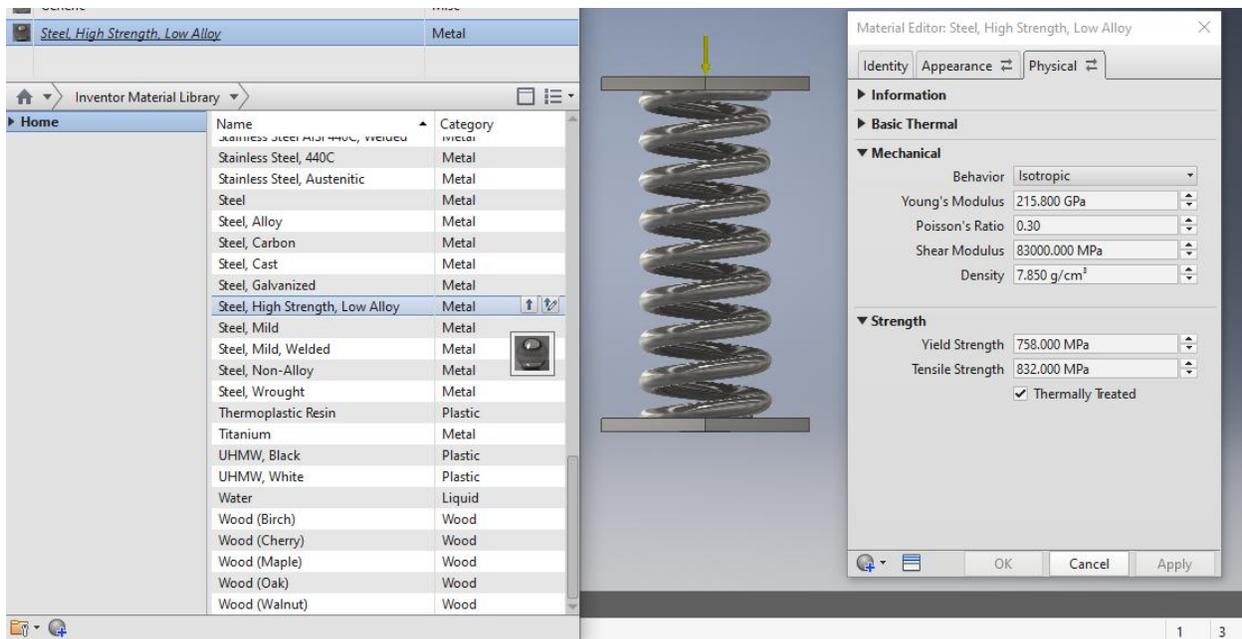


Figura 19: Introdução das propriedades mecânicas do material SAE 5160.

Fonte: (Autor)

Conforme a figura 19, pode-se observar que o módulo de young é de 215,8 GPa e o coeficiente de poisson de 0,3.

#### 5.6.4. Aplicação da carga e condições de contorno

As cargas e condições de contorno do modelo a ser analisado, são de extrema importância, visto que estes são os que definiram as características da operação realizada.

Como o software utilizado aplica forças e condições de contorno somente em nós, foram adicionados uma série de nós ao modelo gerado da Figura 18, onde que a aplicação das forças e as condições podem ser observadas na figura 20.

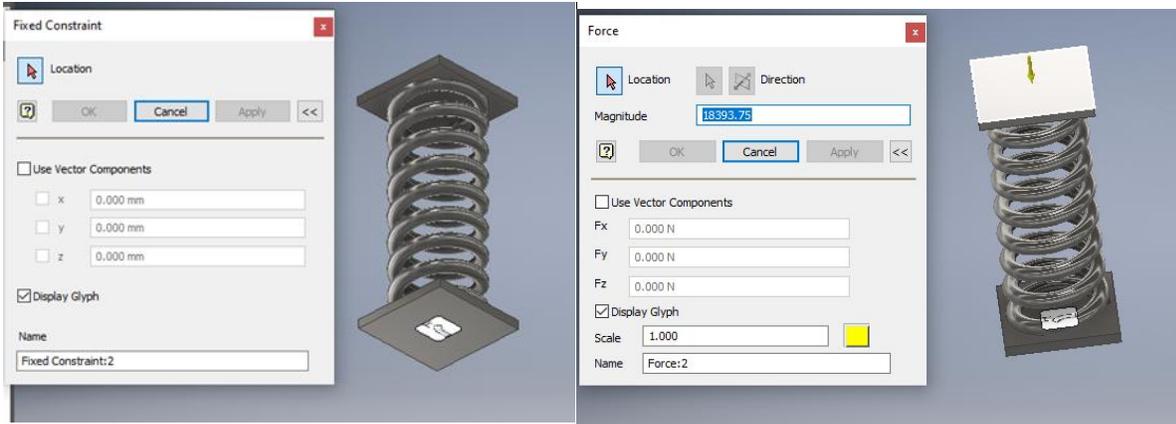


Figura 20: Escolha do ponto de apoio e aplicação de carga.

Fonte: (Autoria Própria)

A carga aplicada segue a mesma do que foi apresentado na figura 20, todavia ao invés de estar em kgf está em N, sendo também que a carga foi dividida ao longo dos diversos nós criados onde se pode observar através da figura 21.

A mola foi dividida em 14755 nós, 7848 elementos, pode-se observar o modelo gerado através da figura 21.

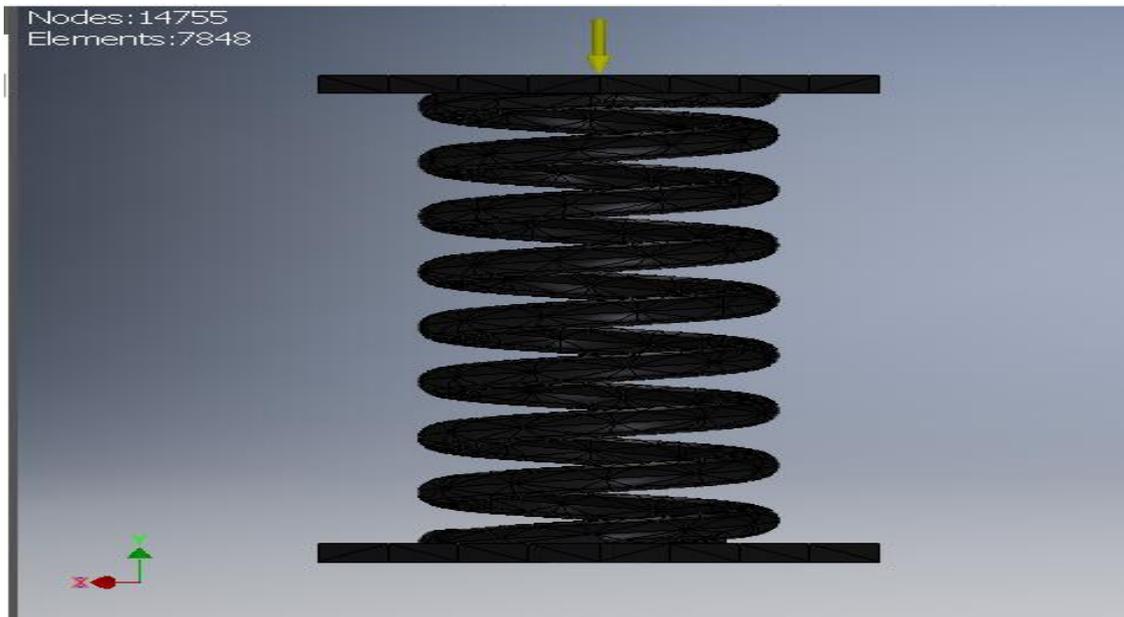


Figura 21: Malha gerada da mola.

Fonte: (Autoria Própria)

A malha gerada aliou a precisão da resposta com a capacidade computacional, uma vez que quanto menor o tamanho do elemento, mais complexa será a análise.

### 5.6.5. Análise dos resultados

Depois de aplicadas as demais etapas, pode-se observar agora o resultado obtido da simulação. A tensão obtida pode ser observada através da Figura 22.

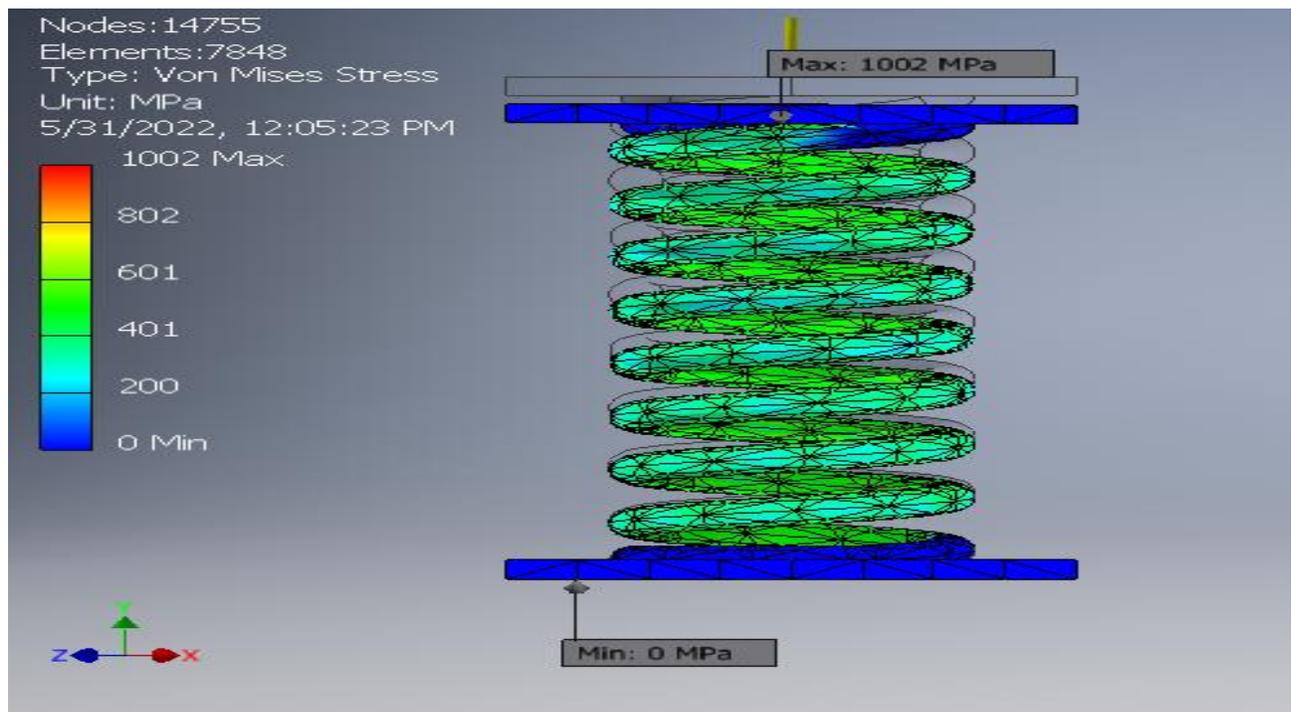


Figura 22: Tensão de Von Mises obtida da simulação da mola.

Fonte: (Autoria Própria)

Pode-se observar através da figura 22 que a maior tensão obtida foi de 1002 MPa, as regiões que se encontram com essa tensão, são demonstradas na figura 23. E é de salientar que esta região é uma zona onde há concentrador de tensões, que é onde se localiza a mudança de secção na mola, de secção retangular (região aplainada) e para redonda que corresponde a secção do diâmetro do arrame.

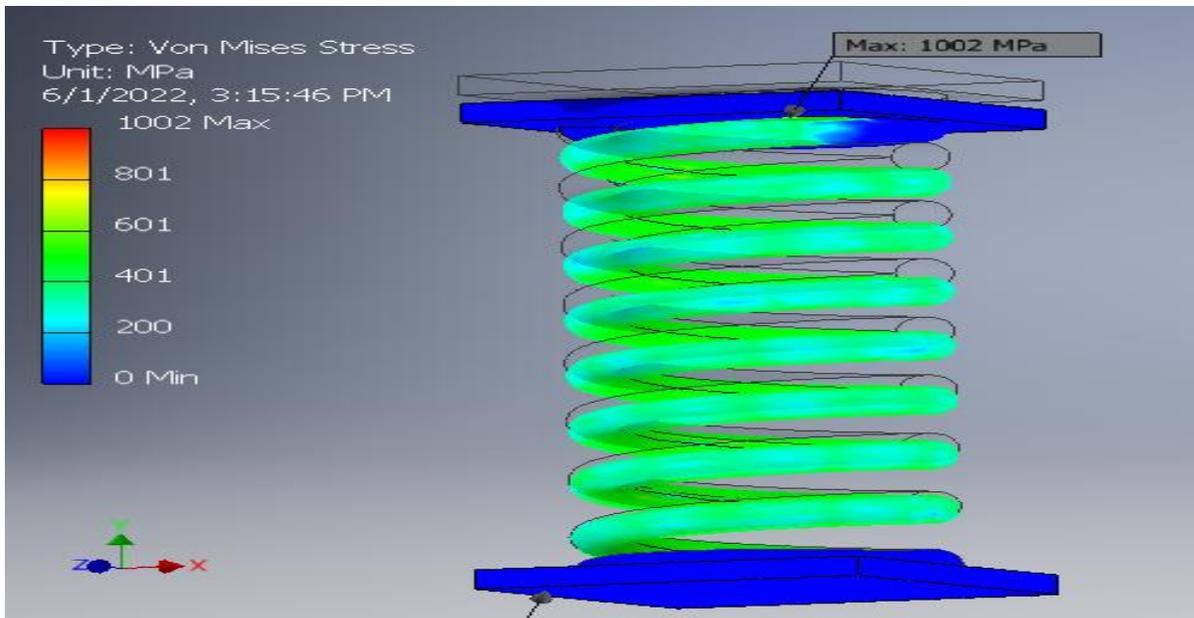


Figura 23: Região de maior tensão da mola.

Fonte: (Autoria Própria)

O deslocamento também obtido da simulação pode ser observado através da figura 24

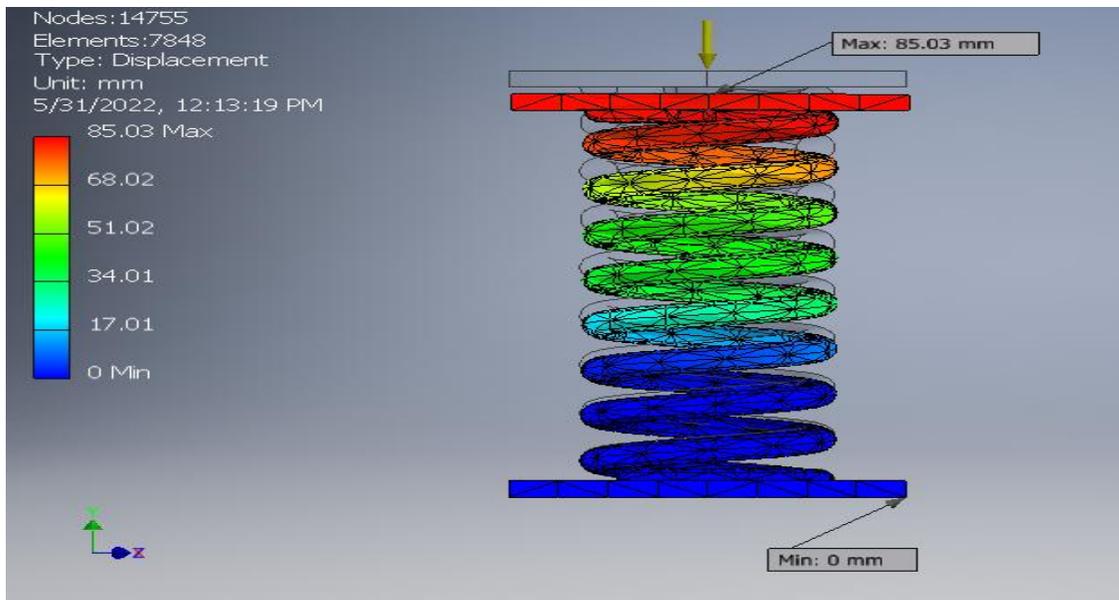


Figura 24: Deslocamento em no eixo y, obtido da simulação da mola.

Fonte: (Autoria Própria)

Pode-se observar através da figura 24 que o deslocamento máximo obtido foi de 85.03 mm.

Em adicional a figura 25 representa os locais que obtiveram maiores deslocamentos na análise.

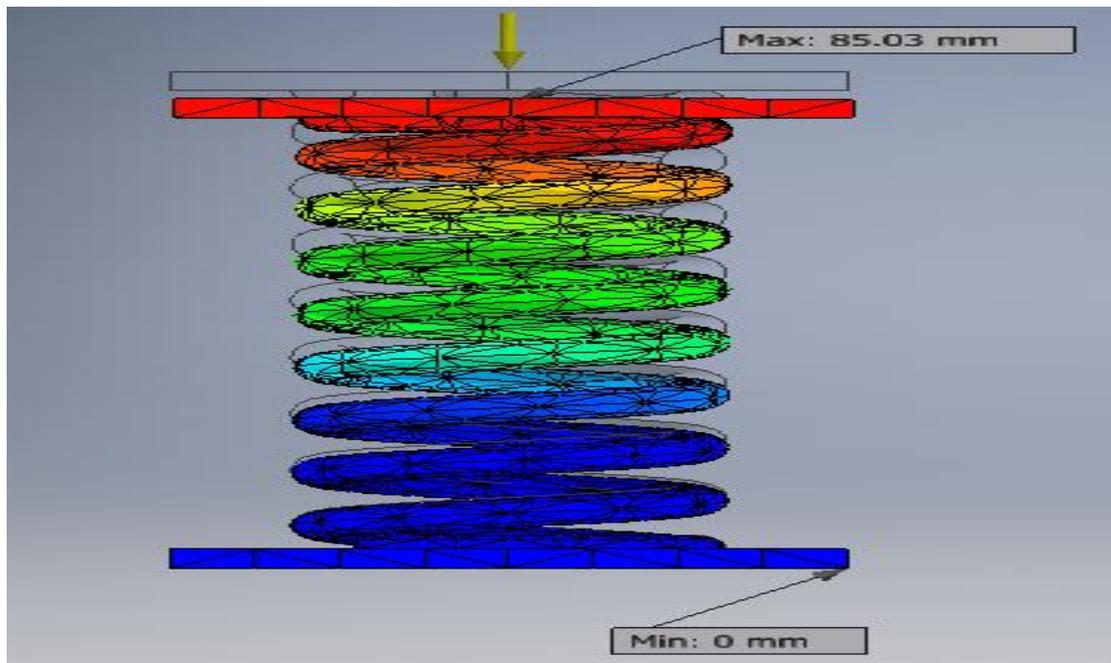
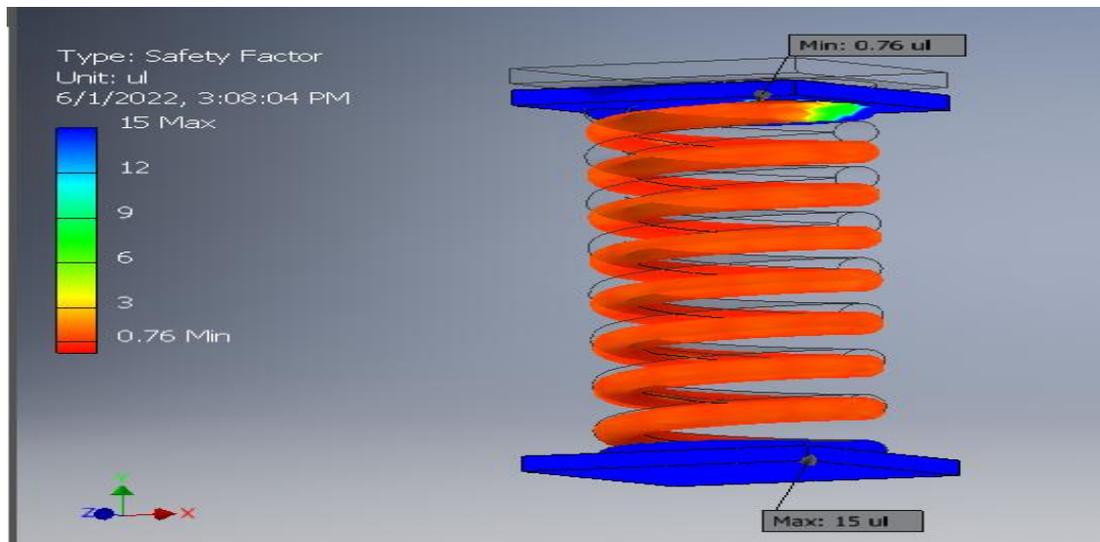


Figura 25: Região com os maiores deslocamentos na mola.

Fonte: (Autoria Própria)

O factor de segurança de fadiga também obtido da simulação pode ser observado através da figura 26.



: Figura 26: factor de segurança de fadiga

Fonte: (Autor)

Em adicional a figura 27 representa os locais que obtiveram menor factor de segurança de fadiga na análise.

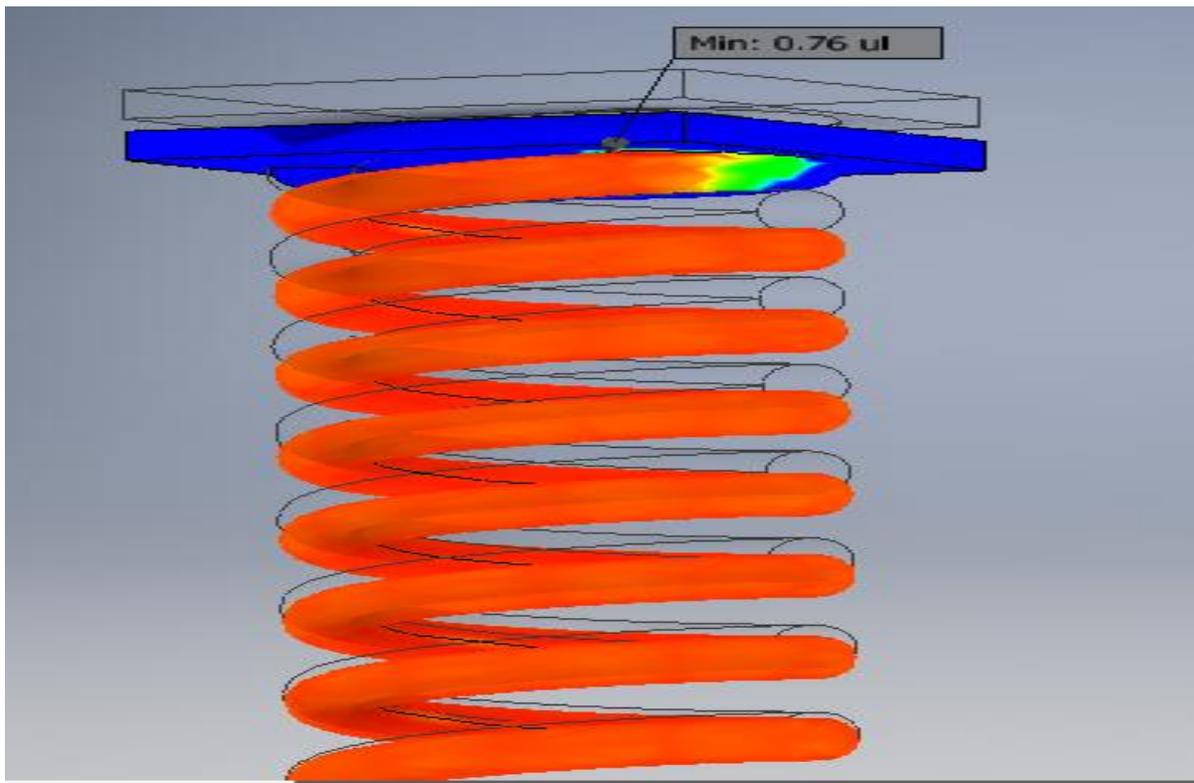


Figura 27: Região com menor factor de segurança de fadiga

Fonte: (Autoria Própria)

Pode-se observar através da figura 27, que o menor factor de segurança de fadiga obtida foi de 0.76, as regiões que se encontram com esse factor de segurança, são demonstradas na Figura 27. E é de salientar que esta região é uma zona onde há concentrador de tensões, que é onde se localiza a mudança de secção na mola, de secção retangular (região aplainada) para redonda que corresponde a secção do diâmetro do arrame.

Em suma nas tabelas a baixo tem-se de forma comparativa:

### **Análise estática**

Tabela 9: Resultados das análises estática, pelos métodos numérico e analítico

<b>Tensão de cisalhamento máximo</b>		<b>Unidade</b>
Método analítico	Método numérico	MPa
370	1002	

### **Deformação**

Tabela 10: Resultados das análises estática (deformação), pelos métodos numérico e analítico

<b>Deformação</b>		<b>Unidade</b>
Método analítico	Método numérico	mm
75.25	85.3	

### **Análise Dinâmica**

Tabela 11: Resultados das análises de fadiga, pelos métodos numérico e analítico

<b>Factor de segurança mínimo (n)</b>		<b>Unidade</b>
Método analítico	Método numérico	-
1.82	0.75	

## 5.7. Análise dos resultados

Com a realização da análise numérica no item 5.6, foi possível simular as condições de análise estática para o caso de uma mola, onde que os resultados de tensão e deformação foram obtidos.

A tensão fornecida pelo software foi de 1002 MPa, ao comparar esta tensão com o limite de escoamento do material, pode-se concluir que se obteve um mau resultado. Mas levando em conta que essa tensão muito elevada é devido ao concentrador de tensão pois, estima-se pela imagem que a tensão predominante esteja entre 300 a 500 MPa. E levando em consideração a tensão calculada pelo método analítico no item 5.2, teve uma tensão de 370 MPa, que é um resultado válido, visto que no modelo analítico foram desconsiderados alguns termos e feitos alguns arredondamentos pelas formulas e deduções.

Em seguida, a deformação na mola pelo Software foi de 85.03 mm, dessa forma comparando esse resultado ao calculo analítico que foi de 75.25 mm com os dados reais e o modelo analítico, havendo divergência embora ambos resultados aceitos. pois a simulação foi devidamente realizada e que os resultados são satisfatórios pois a deformação máxima esperada era de 117.11mm.

Em semelhança com a análise estática, a análise da fadiga pelo software também falha na região com concentração de tensão, com um fator de segurança a fadiga mínimo de 0.76, mas pelas imagens no resto das malhas predomina um factor de segurança superior a 1, e nos cálculos analíticos pelo critério de Goodman tem se factor de segurança a fadiga igual á 1.82 respetivamente, que é satisfatório.

A figura a baixo ilustra a região onde localiza se o concentrador de tensão e que por consequência a causa da roptura da mola.

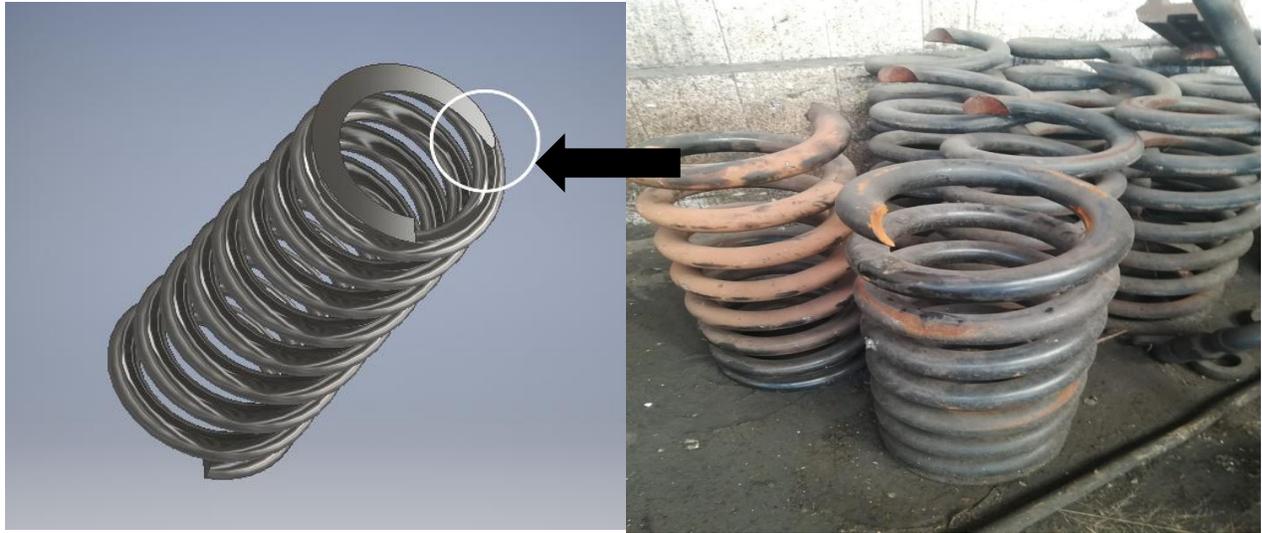


Figura 28: ilustra a região onde localiza-se o concentrador de tensão e de onde as molas rompem.

Fonte: (Autor)

## **CAPITULO VI. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **6.1. Conclusões**

Com o presente estágio foi possível, consolidar os conhecimentos obtidos ao longo da formação académica, proporcionando uma experiencia académico-profissional através de vivencias no campo da pratica em manutenção de locomotivas no seu todo e no manuseio de maquinas assim como ferramentas.

E da analise foi possível fazer a analise estática e dinâmica das molas externas da caixa de rolamento das locomotivas C30-ACi.

Também constatou-se que a analise analítica não é precisa quanto a demonstração dos resultados, ao passo que pelo método de elementos finitos com o uso da ferramenta Autodesk Inventor® foi possível fazer a modelagem da mola, e efectuar as respectivas analises, e pelas simulações foi possível concluir que a mola falha por causa de concentradores de tensões gerado pela mudança de secção imposto ao arame da mola na zona esquadrada aplainada e redonda, verificando falha a cargas estáticas assim como dinâmicas.

## **6.2. Recomendações**

Com base no trabalho realizado recomenda-se a montagem de um alicerce de borracha que possa minimizar o efeito da concentração de tensões no contacto entre a mola-bogie e mola-caixa de rolamentos. E cumprir com a manutenção adequada dos amortecedores para garantir um óptimo funcionamento das molas.

A realização de uma análise de falhas é de grande importância para estudos voltados aos sistemas de suspensão, desta forma recomenda-se a realização de estudos futuros das falhas em molas, tendo como base a análise de todo o conjunto de suspensão de uma forma dinâmica.

## **6.3. Propostas de trabalhos futuros**

Na sequência da presente investigação, considera-se de interesse estudar, numa perspectiva futura, os conteúdos que de seguida se apresentam.

Devem ser analisadas também a influência de certos parâmetros na vida à fadiga das molas (acabamento superficial, tensões residuais provenientes do fabrico das molas, meio ambiente, temperatura, tratamento térmico, concentração de tensões no arame da mola, ...) e o efeito da tensão média na vida à fadiga das molas helicoidais.

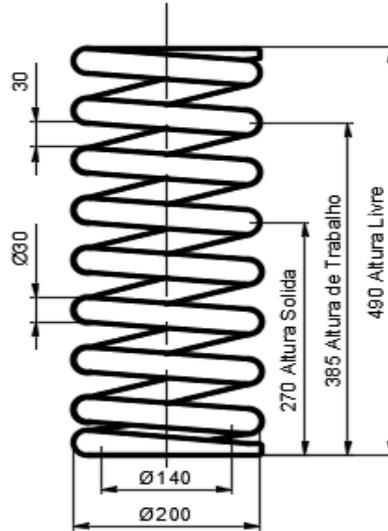
## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANSYS 15. ANSYS Inc. PDF Documentation for Release 15.0.
- [2] BEER, F.P., JOHNSTON, E.R., Resistência dos Materiais, Segunda Edição, McGraw-Hill, São Paulo, 1989.
- [3] Bettazzi, G.C. 2003. “á Análise da Força Longitudinal Devida a Frenagem Considerada Pela NBR7187” â. Universidade Federal da Bahia.
- [4] Borba, José Luiz. 2011. Mecânica de Locomotivas. Editado por VALE. 1ª ed. Belo Horizonte - MG.
- [5] BRANCO, C.M., 2006. “Mecânica dos Materiais”. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa – Portugal.
- [6] Brina, Helvecio Lapertosa. 1998. Estradas de Ferro. 2ª Edição. Minas Gerais - Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG.
- [7] CFM. 2016. Material Rebocado: Estrutura e Reparação. Editado por Oficinas Gerais. 1ª ed. Maputo.
- [8] CNT. 2013. o Sistema Ferroviário Brasileiro. Editado por CNT. Brasília.
- [9] COUTO, A.A, ANDRADE, A.H.P., ZEPTER, P.G., CARVALHO, G.V., CABRAL, A., COLÓRIO, M.A., VATAVUK, J., 2007. “Influência da Microestrutura no Comportamento Mecânico do Aço SAE 5160 Sob Carregamento Monotônico e Cíclico”. Em 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. - CIBIM8, 2007. Cusco, PE.
- [10]. Fish, J., e T. Belyschko. 2007. “A First Course In Finite Elements”. Editado por Willey. New England.
- [11]. Gil, António Carlos. 2008. Métodos e técnicas de pesquisa social. Editado por Editora Atlas. 6ª edição. São Paulo.
- [11]. GUERRA, Marcus Vinícius Rocha G. Desenvolvimento e Análise de um Projeto de Feixe de Molas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade de Brasília - UnB, Faculdade UnB Gama – FGA. Brasília, 2016.
- [12]. Imhof, Marcos. 2014. “á Análise estática da mola externa da caixa de rolamento de uma locomotiva diesel-elétrica” â. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [13] MATTOS, M.G., 2006. “Capacidade de Produção das Oficinas de Locomotivas em Função das Necessidades Operacionais”. Trabalho de conclusão de curso, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro - RJ.
- [14]. MENDES R. M.; Elementos de máquinas – Molas; Escola Superior de Tecnologia – I.P.S.; 2003.

- [15]. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. 2012. Operação Ferroviária. Editado por UNIX-VALE. São Paulo.
- [16]. Silva, Paulo da. 2012. Mecânica de Vagões. Editado por ISUTC/VALE/CFM. 1ª ed. Maputo: ISUTC.
- [17]. Siteo, Rui Vasco. 2010. Manual de Órgãos de Maquinas I. 1ª ed. Maputo.
- [18] SURESH, S. Fatigue of Materials. [S.l.]: Cambridge University Press, v.2. 1998.
- [19] SHIGLEY, J.E., MISCHKE, C.R., BUDYNAS, R.G. “Projeto de Engenharia Mecânica” Bookman; 7ª. Ed; 2005. 957 p.

## ANEXOS

**DEMA- EP-2022-DP001.**



Anexo 1:mola da caixa de rolamentos

Anexo 2

**DEMA- EP-2022-DP002.**

Anexo 2: Caixa de rolamentos

Anexo 3

**DEMA- EP-2022-DM001.**

Anexo 3: Sistema de suspensão primaria