

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
FERROVIÁRIA E METROVIÁRIA

Marcos Imhof

**ANÁLISE ESTÁTICA DA MOLA EXTERNA DA CAIXA DE
ROLAMENTO DE UMA LOCOMOTIVA DIESEL-ELÉTRICA**

Joinville

2014

Marcos Imhof

**ANÁLISE ESTÁTICA DA MOLA EXTERNA DA CAIXA DE
ROLAMENTO DE UMA LOCOMOTIVA DIESEL-ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Banca Examinadora da
Universidade Federal de Santa Catarina para
a obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Ferroviária e Metroviária, sob a
orientação do Professor Thiago Antonio
Fiorentin.

Joinville

2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Imhof, Marcos

Análise estática da mola externa da caixa de rolamento
de uma locomotiva diesel-elétrica / Marcos Imhof ;
orientador, Thiago Antonio Fiorentin - Joinville, SC, 2014.
70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.
Graduação em Engenharia Ferroviária e Metroviária.

Inclui referências

1. Engenharia Ferroviária e Metroviária. 2. Modal
ferroviário. 3. Matriz de transporte brasileira. 4.
Sistema de suspensão. 5. Efeitos vibratórios. I. Antonio
Fiorentin, Thiago. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Ferroviária e
Metroviária. III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Campus Joinville

Rua Doutor João Colin, 2700 – Saguçu – CEP: 89218-035– Joinville – SC

Telefone: (47) 3461-5900 Website: <http://www.joinville.ufsc.br/>

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 01 dias do mês de dezembro do ano de 2014, às 10:00 horas, no Campus Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso, como requisito curricular indispensável à integralização do Curso de Engenharia Ferroviana e Motoviária do(a) aluno(a) Marcos Imhof, intitulado Análise estática da mola externa da caixa de solamento de uma locomotiva diesel-elétrica.

A Banca Examinadora, composta por:

Thiago Antonio Fiorentin (Orientador como presidente),
Moisés Augusto Ferrer (1º membro),
Joselson Ricardo Gerbasi (2º membro),

deliberou e decidiu, pela

- Aprovação;
 Aprovação condicionada;
 Reprovação

do trabalho com nota final em conformidade com o R. 4.

Alterações solicitadas: verificar as assinaturas dos membros da banca nas versões impressas.

Eu, presidente da banca, lavrei a presente ata que segue assinada por mim, pelos demais membros da Banca Examinadora.

Thiago A. Fiorentin

Presidente da Banca Examinadora

Moisés Augusto Ferrer

1º Membro

Joselson Ricardo Gerbasi

2º Membro

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que
me apoiaram ao longo da minha
formação acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que participaram na minha
vida até hoje, principalmente:

Minha família por sempre dar suporte
as minhas decisões tomadas.

A meus amigos que proporcionaram alegria e
companheirismo nos momentos mais difíceis.

Aos professores que me passaram conhecimentos
ao longo desta etapa.

Aos diversos profissionais que tive a oportunidade
de trabalhar ao longo dos estágios.

RESUMO

O aumento da utilização do modal ferroviário destinado principalmente para o transporte de carga vem fazendo com que a matriz de transporte brasileira se altere de maneira que se consiga aumentar a intermodalidade dentre os modais de transporte, desta forma torna-se possível elevar a eficiência e confiabilidade do transporte de carga, juntamente com a diminuição do custo desta atividade. Levando-se em consideração que o veículo ferroviário é demasiadamente caro e sujeito a elevadas cargas cíclicas, para que seja viável seu uso deve-se garantir que o amortecimento de tais cargas seja de tal maneira que o veículo consiga funcionar sem que seu desempenho e segurança sejam afetados devido à má qualidade do sistema de suspensão. Os efeitos vibratórios e ruídos na operação de um trem podem ser atenuados através de um sistema de suspensão, onde que este será responsável por proporcionar uma boa aderência do truque aos trilhos, utilização eficiente das forças de tração e um isolamento apropriado do equipamento e do pessoal de operação, dos choques e vibrações provocadas pelas irregularidades da via permanente. Desta forma faz-se necessário a obtenção de um sistema de suspensão que consiga atuar na locomotiva, trazendo um maior amortecimento para que os esforços repassados ao veículo, não venham a causar nenhuma avaria a qualquer parte do veículo como um todo, ou acarretando em um possível acidente.

Palavra-chave: Modal Ferroviário; Matriz de Transporte Brasileira; Sistema de Suspensão; Via Permanente; Efeitos Vibratórios; Ruído.

ABSTRACT

Currently with the increased use of railroad primarily intended for the transport of cargo, is causing a matrix change on Brazilian transport, so that is able to improve of the intermodal transport, thus becomes possible to increase efficiency and reliability of freight transport, along with reducing the cost of this activity. Taking into consideration that the rail car is too expensive and subject to high cyclic loads, for the use of this system it's important to ensure that the damping of such loads is such that the vehicle can operate without its performance and safety be affected due to poor quality of the suspension system. The noise and vibration effects in the operation of a train can be mitigated through a suspension system, where this equipment will be responsible for providing a good grip on track track, efficient use of traction forces and proper isolation of equipment and personnel operation, shocks and vibrations caused by irregularities of the permanent way. In this context, is necessary have a good suspension system that can operate in the locomotive, bringing more damping for efforts passed to the vehicle will not causing any damage to any part of the vehicle as a whole, or resulting in a possible accident.

Keyword: Modal Rail; Brazilian Transportation Matrix; Suspension System; Permanent Way; Vibratory Effects; Noise.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Transferência de energia de um locomotivo diesel elétrica.....	6
Figura 2. Locomotiva diesel-elétrica utilizada pela empresa Vale.....	6
Figura 3. Tipos de Tração em locomotivas.	7
Figura 4. Componentes de uma locomotiva diesel elétrica.	9
Figura 5. Suspensão primária de uma locomotiva.	11
Figura 6. Suspensão secundária de uma locomotiva.....	12
Figura 7. Suspensão primária de uma locomotiva.	13
Figura 8. Mola helicoidal externa da caixa de rolamento.	14
Figura 9. Ligação do <i>bolster</i> à estrutura do truque através de molas helicoidais.	15
Figura 10. Ligação do <i>bolster</i> à estrutura do truque através de coxins de borracha.	15
Figura 11. Resultado dos deslocamentos em mm de uma análise numérica de uma mola.....	16
Figura 12. Resultado da tensão <i>Von Misses</i> em MPa de uma análise numérica de uma mola.....	16
Figura 13. Base de referência do rodeiro em relação à base da via.	18
Figura 14. Graus de liberdade representados por vetores.	19
Figura 15. Movimentos de um vagão.	20
Figura 16. Truque com dois rodeiros e quatro suspensões primárias.....	21
Figura 17. Cotas da vista lateral da locomotiva C30-7.....	28
Figura 18. Cotas da vista frontal da locomotiva C30-7.....	29
Figura 19. Cotas da mola externa da caixa de rolamento.	30
Figura 20. Variáveis de uma mola helicoidal.....	32

Figura 21. (a) Mola helicoidal carregada longitudinalmente, (b) diagrama de corpo livre mostrando que o fio está sujeito a um cisalhamento direto e outro de torção.	33
Figura 22. Modelo físico da mola gerado no software.....	43
Figura 23. Propriedades mecânicas do material SAE 5160	44
Figura 24. Aplicação de carga e condições de contorno no modelo.	45
Figura 25. Carga aplicada na mola (a) tela de adição da força e (b) cargas adicionadas	45
Figura 26. Aplicação das condições de contorno (a) tela de adição das condições de contorno e (b) regiões da condições	46
Figura 27. Malha gerada da mola.....	47
Figura 28. Tensão Von Misses obtida da simulação da mola.	48
Figura 29. Região de maior tensão da mola.....	48
Figura 30. Deslocamento em y, obtido da simulação da mola.	49
Figura 31. Região com os maiores deslocamento na mola.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Componentes vitais de uma locomotiva.....	10
Tabela 2. Características do material SAE 5160.....	31
Tabela 3. Geometria da mola C30-7 inserida no software	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D:	Tridimensional
ACT:	Aparelho de Choque e Tração
ALL:	América Latina Logística
ANTF:	Associação Nacional do Transportes Ferroviários
AAR:	Association of American Railroads
CA:	Corrente Alternada
CC:	Corrente Contínua
CNT:	Confederação Nacional do Transporte
HRC:	Escala C de dureza Rockwell
MEF:	Método dos Elementos Finitos
GE:	General Eletric
SAE:	Society of Automotive Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino

A :	Área circular do arame
C :	Índice da mola
D_e :	Diâmetro externo
D_i :	Diâmetro interno
D_m :	Diâmetro médio da mola
d :	Diâmetro do arame
d_i :	Operador diferencial de compatibilidade
d^* :	Operador diferencial de equilíbrio
d^T :	Matriz transposta do operador diferencial
E :	Módulo de Young
F :	Força aplicada
F :	Vetor de forças
f :	Matriz de flexibilidade infinitesimal
G :	Módulo de elasticidade transversal
H :	Formato de fixação dos rodeiros com o truque
J :	Momento polar de inércia
L :	Litros
Km :	Quilômetros
k :	Constante elástica
k :	Matriz de rigidez infinitesimal
K_b :	Fator de Bergsträsser

K_s :	Coeficiente de curvatura
N :	Número de espiras
N :	Matriz da normal exterior à fronteira
p :	Pitch da mola
r :	Raio do arame
rm :	Raio médio da mola
T :	Torque aplicado na mola na mola
$t\Gamma$:	Vetor da tensão imposta na fronteira estática
u :	Deslocamento da mola
u :	Vetor de deslocamentos da mola
$u\Gamma$:	Vetor dos deslocamentos impostos na fronteira cinemática
ν :	Coeficiente de Poisson
y_1 :	Distância inicial entre as extremidades da mola
y_2 :	Distância final entre as extremidades da mola
y_{ij} :	Componente de distorção
x, y, z :	Abscissa, ordenada e cota, respectivamente, no eixo cartesiano

Alfabeto grego

Γ :	Fronteira do domínio
Γ_t :	Fronteira estática
Γ_u :	Fronteira cinemática
Ω :	Domínio
δ :	Deformação da mola
ε :	Vetor de deformação
$\varepsilon\theta$:	Vetor das deformações térmicas generalizadas

θ :	Ângulo de hélice
θ :	Ângulo de rotação da roda
φ :	Ângulo de rolagem em torno de da abscissa
φ :	Ângulo de rotação da espira
ψ	Ângulo de ataque
σ :	Vetor de tensões
τ :	Tensão de cisalhamento
τ_m :	Tensão máxima
τ_m :	Tensão máxima com o fator corretivo de curvatura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Problemática.....	2
1.3. Justificativa.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Locomotiva diesel elétrica	5
2.2. Componentes de uma locomotiva	7
2.3. Suspensão.....	11
2.3.1. <i>Suspensão primária</i>	13
2.3.2. <i>Suspensão secundária</i>	14
2.3.3. <i>Esforços aplicados no sistema de suspensão</i>	15
2.4. Modelagem dinâmica de uma locomotiva.....	17
3. MODELO ANALÍTICO DA MOLA	22
3.1. Locomotiva C30-7	22
3.2. Mola externa da caixa de rolamento da locomotiva C30-7	30
3.3. Modelo analítico da mola.....	31
3.4. Análise dos resultados	36
4. MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS	37
4.1. Fundamentos do MEF em 3D.....	37
4.2. Aplicação do MEF	41
4.3. Análise numérica	42
4.3.1. <i>Geração do modelo físico</i>	42
4.3.2. <i>Escolha das propriedades do material</i>	44
4.3.3. <i>Aplicação de cargas e condições de contorno</i>	44
4.3.4. <i>Geração da malha</i>	46
4.3.5. <i>Análise dos resultados</i>	47
4.4. Análise dos resultados	50
5. CONCLUSÃO	51
6. SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTUROS	52

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXOS	56

1. INTRODUÇÃO

Ao discutir quais são os elementos de maior influência de um país devemos necessariamente considerar a importância de se ter um sistema de transporte eficiente (CNT, 2013).

O modal ferroviário, em função de suas características, possui grande eficiência, consagrando-se como um veículo de transformação econômica e assumindo um papel estratégico na matriz de transporte (CNT, 2013).

Devido à má gestão das ferrovias brasileiras, entre 1996 e 1998 houve, a desestatização das malhas férreas, acarretando em um aumento dos investimentos no setor ferroviário (BARBIERI, 2003).

A opção pela reutilização do modal deu-se devido à eficiência e produtividade do transporte ferroviário, além da receita para cofres públicos (BARBIERI, 2003).

Para que o desenvolvimento fosse possível, necessitou-se de veículos mais eficientes e rápidos, aparecendo, portanto, as locomotivas diesel-elétricas modernas, que proporcionam maiores velocidades de operação, fazendo com que o custo logístico baixe e o conseqüentemente aumente o lucro.

O número de locomotivas vem aumentando significativamente, onde que houve um aumento de cento e dezessete por cento entre 1997 à 2012, sendo a maior parte dessas, locomotivas diesel-elétricas (ANTF, 2012).

Existe em torno de oitenta e seis mil locomotivas diesel no mundo, sendo que cinquenta e seis por cento do total são diesel-elétricas, resultando em aproximadamente quarenta e oito mil locomotivas. (BORBA, 2009).

O sistema de suspensão é um elemento indispensável para o funcionamento de um veículo ferroviário, pois proporciona aderência do truque aos trilhos e utilização eficiente das forças de tração (BORBA, 2009).

Existem dois tipos de suspensão em uma locomotiva, a primária que se situa entre a estrutura do truque e as caixas de rolamento nas extremidades do eixo do rodeiro e a secundária, localizada entre a travessa flutuante e a estrutura do truque.

A suspensão primária irá amenizar os impactos provenientes da interação roda-trilho, amortecendo também todo o peso da locomotiva.

A secundária por outro lado, irá absorver os impactos provindos da estrutura do truque para a plataforma e também os choques devido aos movimentos verticais da carroceria.

Geralmente as locomotivas brasileiras possuem seis eixos, sendo duas suspensões primárias por eixo e que cada uma dessas suspensões possuem quatro molas, duas internas e duas externas, ou seja, ao menos quarenta e oito molas por locomotiva.

1.1. Objetivos

O trabalho visa realizar uma análise estática na mola externa da caixa de rolamento da suspensão primária de uma locomotiva diesel-elétrica da GE do modelo C30-7 que é utilizada pela empresa ALL.

Para alcançar tal objetivo, será realizada uma modelagem da mola, onde que para isso serão feitos modelos analítico e numérico deste componente do sistema de suspensão.

Por fim, os dados obtidos de ambas as análises serão comparados com dados do material e de um modelo real da mola.

1.2. Problemática

Em virtude do aumento da demanda do setor ferroviário, necessita-se de veículos cada vez mais eficientes, confiáveis e rápidos, que consigam

transportar mais carga com um menor custo, tornando o produto brasileiro cada vez mais competitivo no mercado.

Veículos ferroviários quando em operação são imposto a uma ampla gama de fatores, 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, levando em consideração que dependendo do tipo de veículo do qual está sendo estudado, será utilizado uma solução diferente.

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.

Desta forma, a fabricação, manutenção e utilização do sistema de suspensão, devem ser devidamente vistoriadas, necessitando de know-how e acompanhamento *in loco* por parte dos responsáveis por cada etapa.

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

1.3. Justificativa

A maior parte das locomotivas utilizadas no Brasil são do tipo diesel-elétrica, onde que o consumo de combustível deste veículo é em torno de 60 a $120 \frac{L}{Km}$ (BORBA, 2009).

De maneira geral, em operações ferroviárias necessita-se ao menos uma locomotiva para cada setenta vagões, sendo que qualquer avaria em uma

locomotiva irá aumentar a taxa de consumo de combustível consideravelmente (CNT, 2013).

O Brasil possui uma posição de destaque na exportação de commodities, desta forma procura-se cada vez mais diminuir o custo de logístico, sendo a ferrovia um dos pilares para que isto ocorra (CNT, 2013).

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 quem se responsabiliza pela maior parte do amortecimento ocasionada principalmente pelas irregularidades da via permanente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais para que se possam realizar os modelos analítico e numérico.

Dentre os itens essenciais tem-se inicialmente a locomotiva diesel-elétrica, que será apresentada no item 2.1, abordado principalmente os modos de transmissão de energia no veículo.

Em seguida, no item 2.2 serão apresentados os componentes principais de uma locomotiva, portanto, será possível dar continuidade ao item 2.3 que tratará de descrever o sistema de suspensão.

Por fim, a teoria apresentada dos itens acima, será abordado uma modelagem dinâmica de uma locomotiva no item 2.4, descrevendo as variáveis que atuam durante a operação deste veículo.

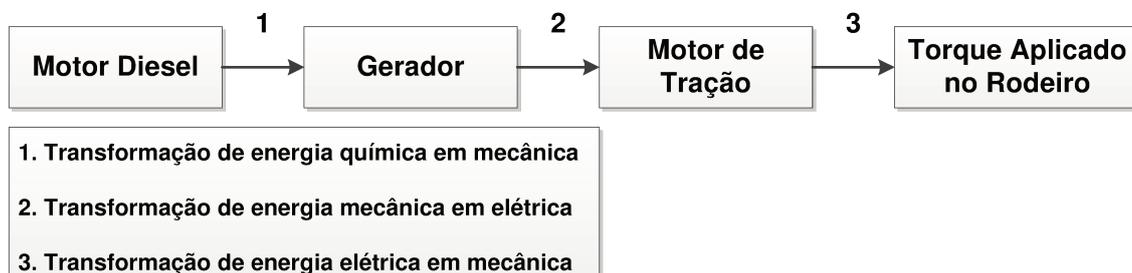
2.1. Locomotiva diesel elétrica

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 elétrica (BETTAZZI, 2013).

Através da Figura 1, pode-se obter um melhor detalhamento da transmissão de energia.

Figura 1. Transferência de energia de um locomotivo diesel elétrica.



Fonte: (Autoria Própria)

De acordo com a Figura 1, a transmissão de energia na locomotiva possui três etapas:

- Transferência de energia química em mecânica através da explosão do combustível e atuação do motor diesel;
- Transferência de energia mecânica em elétrica através do gerador;
- Transferência de energia elétrica em mecânica através do motor de tração.

Depois de realizadas as etapas acima é que o motor de tração, que é acoplado no rodeiro, irá aplicar o torque necessário para o veículo se locomover.

A Figura 2 representando um modelo de locomotiva diesel elétrica.

Figura 2. Locomotiva diesel-elétrica utilizada pela empresa Vale.



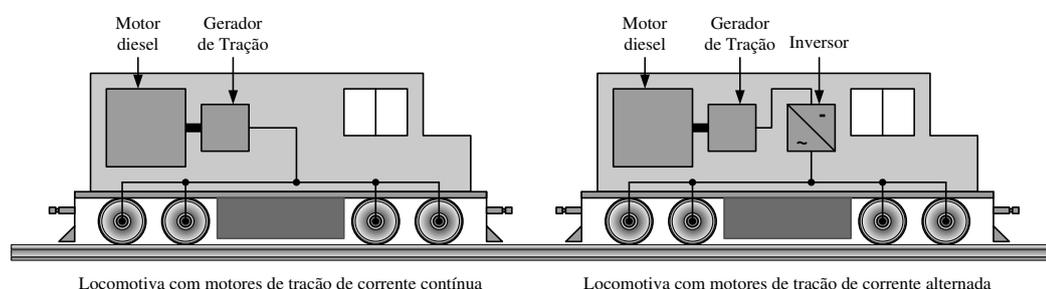
Fonte: (BORBA, 2009)

A locomotiva diesel-elétrica é utilizada em grande escala para o transporte ferroviário de carga, devido a sua eficiência ser superior as mecânicas e manutenção menos complexa que as hidráulicas (BORBA, 2009).

Um fator diferencial deste veículo é ter seu sistema de produção e geração de energia elétrica completa e isolada, ou seja, ele carrega sua própria estação de energia, diferentemente das locomotivas elétricas (BORBA, 2009).

Os motores diesel-elétricos podem trabalhar em corrente contínua ou alternada, onde que eles se diferem na presença de um inversor, sendo este dispositivo o responsável por converter as correntes, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3. Tipos de Tração em locomotivas.



Fonte: (BORBA, 2009)

De maneira generalizada o gerador é de CA, retificada para CC pelos tiristores, pois os motores de tração trabalham apenas em CC, dessa forma não há qualquer conexão mecânica entre o motor diesel e o eixo (SILVA, 2006).

Por final, tal veículo não necessita da instalação e manutenção de catenárias, sendo assim, os investimentos iniciais na infraestrutura mais baratos quando comparado com as locomotivas elétricas.

2.2. Componentes de uma locomotiva

Devido à robustez de uma locomotiva, faz-se necessário uma ampla gama de componentes, sendo estes divididos em quatro sistemas que desempenham papéis essenciais para o veículo.

O sistema de tração é o responsável por proporcionar a força necessária para a locomoção do veículo, tendo como principais componentes, o gerador de tração, motor diesel e o motor de tração.

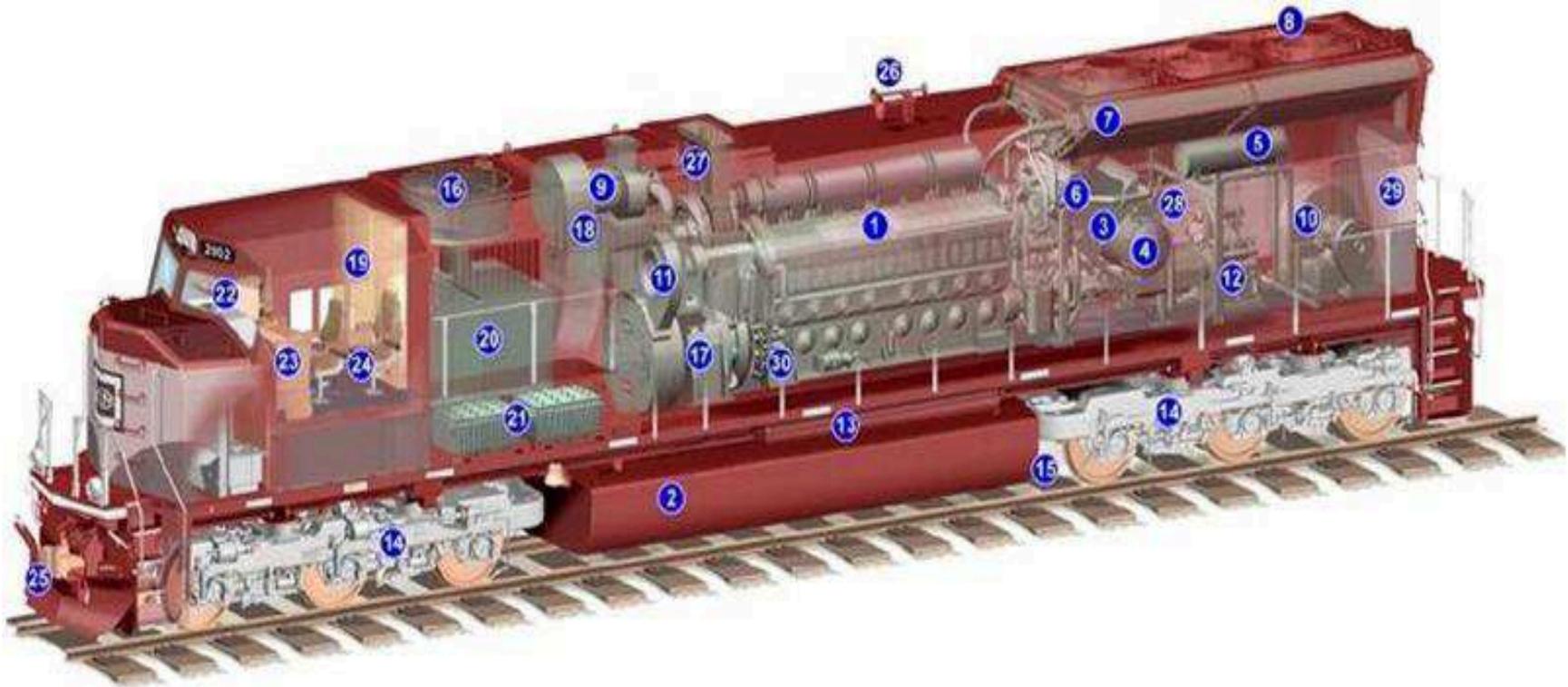
O sistema de frenagem é o responsável pela frenagem do veículo, tem como principais componentes, a timoneria de freio, cilindro de freio, sapatas, contra sapatas e freio dinâmico.

O sistema estrutural é quem atenua e distribui as cargas cíclicas verticais, laterais e horizontais aplicadas ao veículo e também quem disponibiliza contato roda trilho, estando ou não em movimento, tem como principais componentes, o truque, cabinas, plataforma e ACT.

O sistema auxiliar coordena as demais funcionalidades vitais para a locomotiva, entre eles os sistemas de admissão de ar, refrigeração, pneumático, reservatórios de ar e combustível e iluminação.

Conforme a Figura 4, pode-se observar a localização dos componentes vitais de uma locomotiva.

Figura 4. Componentes de uma locomotiva diesel elétrica.



Fonte: (BORBA, 2009)

Os demais itens numerados na Figura 4 podem ser conferidos através da Tabela 1.

Tabela 1. Componentes vitais de uma locomotiva.

Nº	Componente	Nº	Componente
1	Motor diesel	16	Freio dinâmico
2	Tanque de combustível	17	Gerador de tração
3	Resfriador de óleo lubrificante	18	Filtro de inércia
4	Filtro de óleo lubrificante	19	Armário elétrico 1
5	Reservatório auxiliar de água	20	Armário elétrico 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 gerador	26	Buzina
12	Compressor de ar	27	Escapamento do motor diesel
13	Reservatório principal de ar	28	Filtro primário de combustível
14	Truque	29	Reservatório de areia
15	Motor de tração	30	Motores de partida

Fonte: (BORBA, 2009)

2.3. Suspensão

O sistema de suspensão é o responsável por absorver impactos irregulares e por distribuir as cargas em um veículo ferroviário, proporcionando uma locomoção mais suave e maior vida útil dos componentes em geral (BORBA, 2009).

As locomotivas diesel-elétricas geralmente possuem dois tipos de suspensão, a primária e a secundária, podendo ser observadas através das Figuras 5 e 6.

Figura 5. Suspensão primária de uma locomotiva.



Fonte (BORBA, 2009)

Figura 6. Suspensão secundária de uma locomotiva.



Fonte: (BORBA, 2009)

Através das Figuras 5 e 6, pode-se observar que a suspensão primária, situa-se entre o truque e a caixa de rolamento nas extremidades do rodeiro, já a secundária encontra-se entre a travessa flutuante e a estrutura do truque.

Geralmente as suspensões dos truques das locomotivas, primárias ou secundárias, utilizam como elementos de suspensão conjuntos ou combinações de molas, dentre elas:

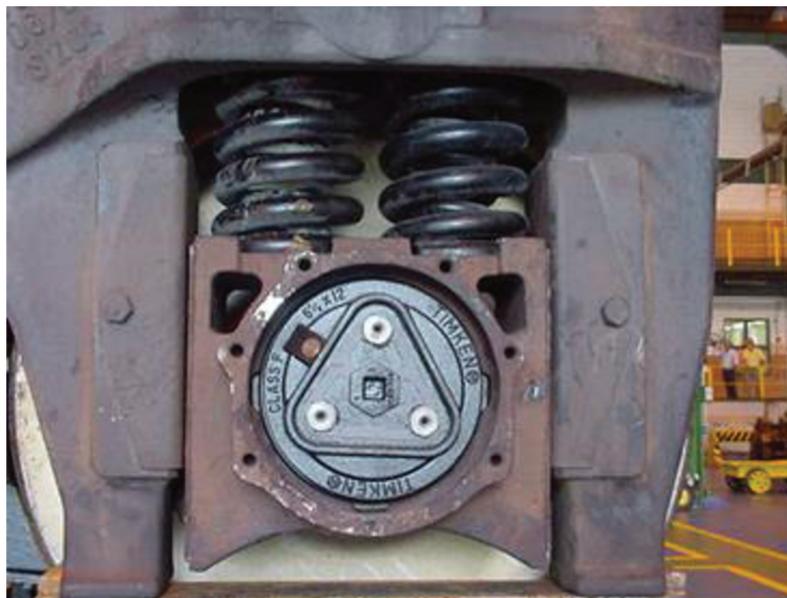
- Molas helicoidais de aço;
- Molas elípticas de aço;
- Molas de corracha paralela (coxins);
- Molas de borracha do tipo V.

Em virtude do papel que o sistema de suspensão exerce dentro do desempenho global e na segurança da locomotiva, a manutenção adequada dos componentes é vital para uma boa operação do veículo (BORBA, 2009).

2.3.1. Suspensão primária

A suspensão primária é quem ameniza os impactos provenientes da interação roda-trilho, ao mesmo tempo ela também faz o amortecimento de todo peso da locomotiva, podendo ser observado na Figura 7.

Figura 7. Suspensão primária de uma locomotiva.



Fonte: (BORBA, 2009)

Conforme a Figura 7 observa-se que a suspensão primária é composta de uma caixa de rolamento montada na ponta do rodeiro.

A base dos pedestais é parafusada a uma placa de aço, na qual limita o deslocamento vertical inferior da caixa de rolamento entre os pedestais e evita as que as bases se distanciem (BORBA, 2009).

Outro elemento da suspensão é o conjunto de molas helicoidais internas e externas, que se apoiam diretamente sobre as caixas de rolamento, pode-se observar um modelo de mola que é utilizada através da Figura 8.

Figura 8. Mola helicoidal externa da caixa de rolamento.



Fonte: (BORBA, 2009)

A mola apresentada na Figura 8 é fabricada conforme a norma AAR, sendo que tal elemento permite grandes deformações elásticas, tendendo a igualar as cargas nas rodas e suavizar a vibração (BORBA, 2009).

2.3.2. Suspensão secundária

A suspensão secundária é responsável por proporcionar rigidez necessária, liberdade de movimento da plataforma em todas as direções e amortecimento vertical para as cabinas.

O *bolster* (travessa flutuante), utilizado para transferir o peso da parte superior da locomotiva para a estrutura do truque. Tal estrutura é ligada ao truque, através de molas helicoidais de aço ou coxins de borracha e aço, dos quais iram absorver os impactos provindos da estrutura do truque para a plataforma e também os choques devido aos movimentos verticais da carroceria.

As Figura 9 e 10 representam cada uma das ligações citadas acima.

Figura 9. Ligação do *bolster* à estrutura do truque através de molas helicoidais.



Fonte: (BORBA, 2009)

Figura 10. Ligação do *bolster* à estrutura do truque através de coxins de borracha.



Fonte: (BORBA, 2009)

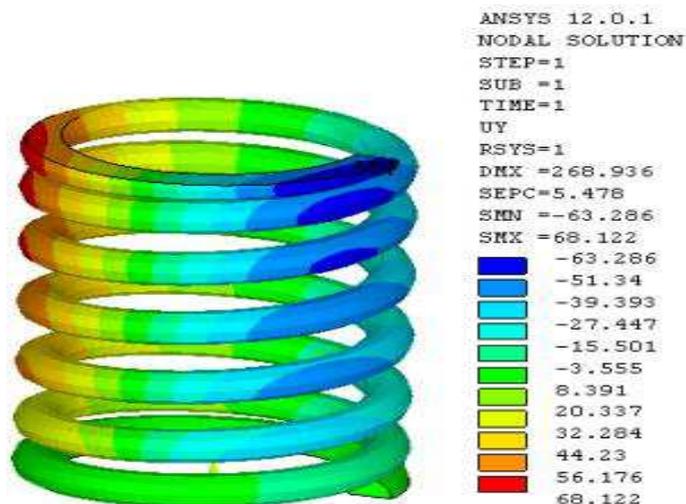
2.3.3. Esforços aplicados no sistema de suspensão

A suspensão pode ser submetida aos esforços dinâmicos e estáticos, onde que o aumento excessivo destas poderá acarretar em impactos danosos ao sistema (GHATE, 2012).

A forma de aplicações das cargas pode variar de natureza axial (tração-compressão), de flexão (dobramento) ou de torção.

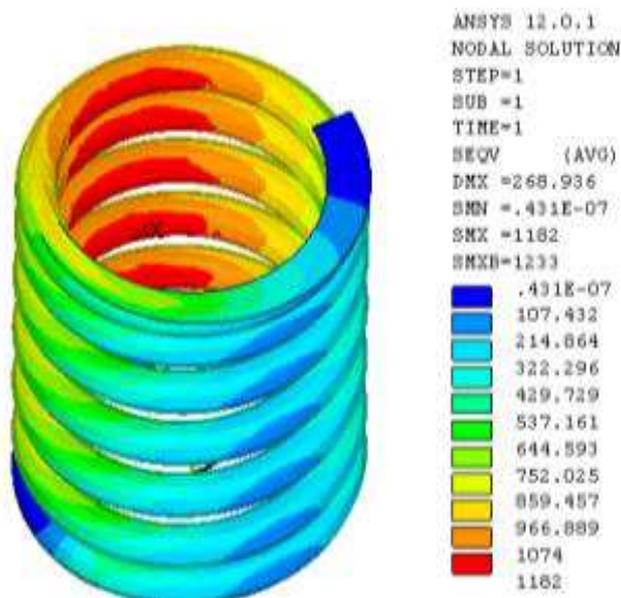
Estudos voltados à análise numérica são comuns para determinar o regime de uma mola, onde que são aplicadas cargas verticais condições de contorno que se aproximem de um caso real, pode-se observar um exemplo através das Figuras 11 e 12.

Figura 11. Resultado dos deslocamentos em mm de uma análise numérica de uma mola.



Fonte: (REDDY, 2013)

Figura 12. Resultado da tensão *Von Mises* em MPa de uma análise numérica de uma mola.



Fonte: (REDDY, 2013)

Levando-se em consideração que a mola da análise numérica demonstrada através das Figuras 11 e 12, possuía inicialmente 269 mm de altura, após a aplicação da carga, obteve-se um deslocamento de 68 mm.

Pode-se observar através da Figura 12 que a tensão obtida foi de 1182 Mpa e ao comparar com o limite do material que é de 1359 MPa, conclui-se que a mola está operando com segurança (REDDY, 2013).

2.4. Modelagem dinâmica de uma locomotiva

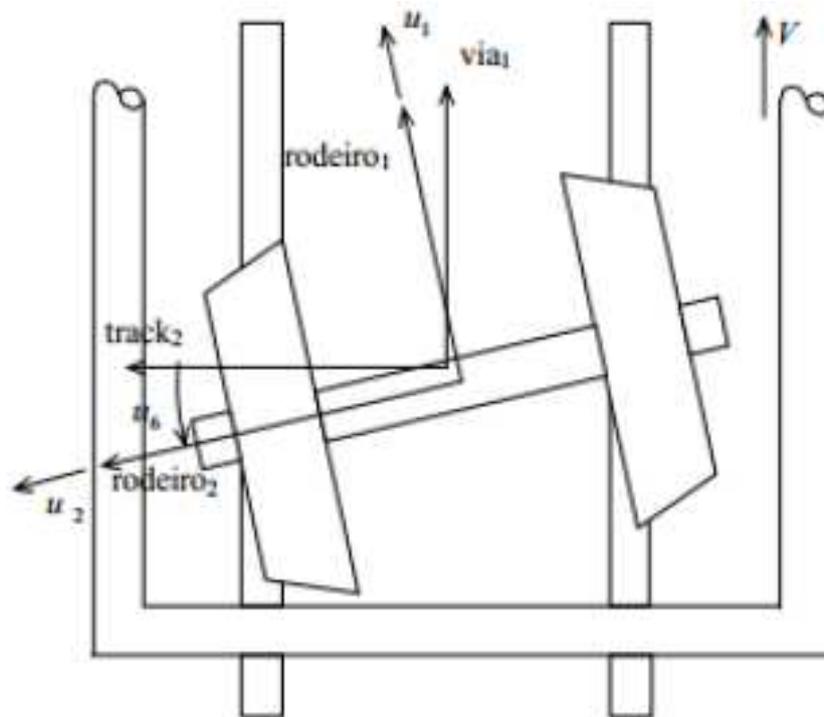
O modelo estrutural de uma locomotiva é composto por rodeiros, truques e cabinas, sendo que os sistemas de suspensão ficam entre as estruturas citadas acima.

Tendo como objeto de estudo a locomotiva C30-7, pode-se definir este veículo em dez corpos, sendo eles:

- 6 rodeiros;
- 2 truques;
- 2 cabinas, uma do maquinista e outra da casa de máquina.

Os rodeiros são fixados nos truques, de tal forma que esta estrutura é apoiada em cima do trilho, como se pode observar através da Figura 13.

Figura 13. Base de referência do rodeiro em relação à base da via.



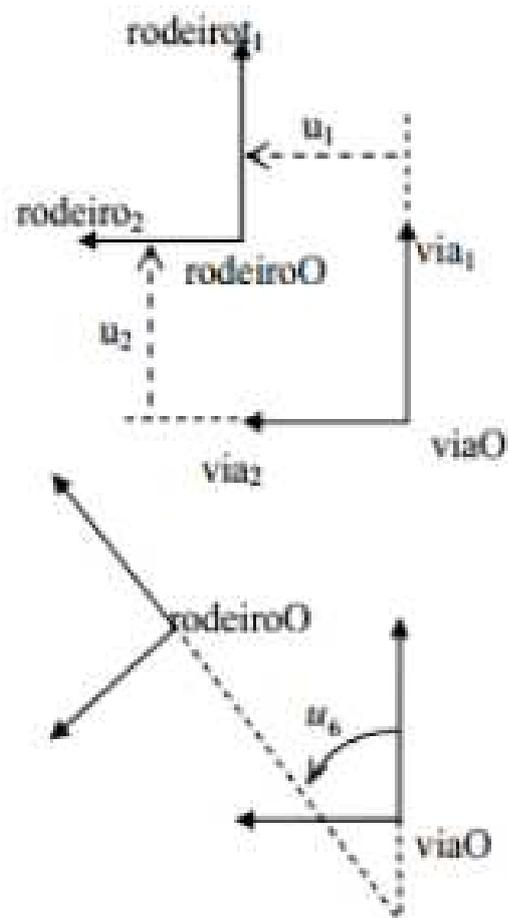
Fonte: (MAXION, 2009)

O modelo apresentado na Figura 13 possui seis graus de liberdade em relação à via sendo eles:

- Três lineares x , y e z ;
- Três angulares φ (rolagem em torno de x), θ (rotação da roda) e ψ (ângulo de ataque, rotação em torno de z).

Estes graus de liberdade estão representados em forma de vetores, conforme a Figura 14.

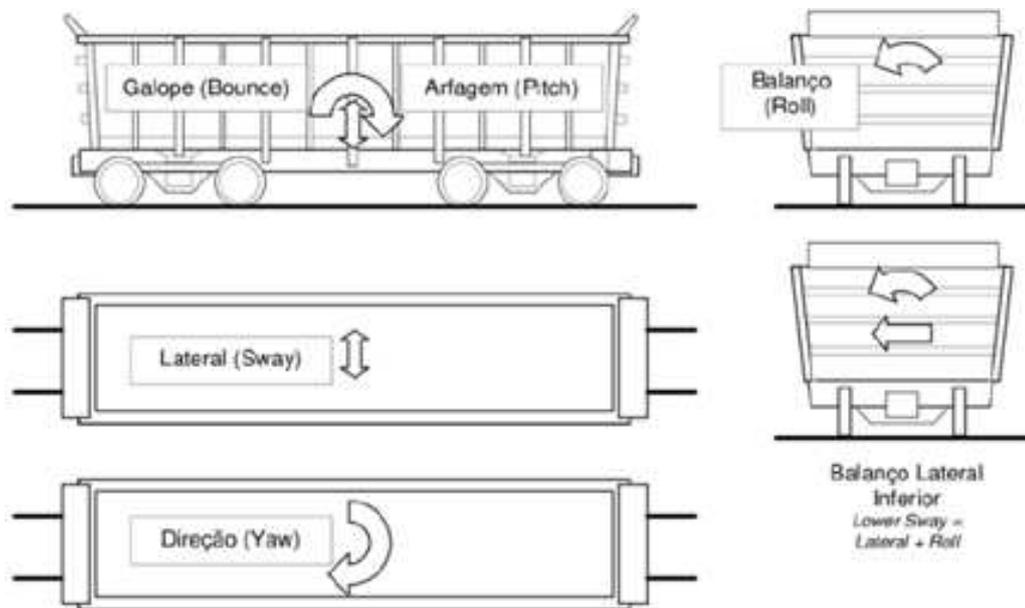
Figura 14. Graus de liberdade representados por vetores.



Fonte: (MAXION, 2009)

De maneira análoga, o veículo como um todo também possui seis graus de liberdade, independentemente se forem locomotivas ou vagões, os movimentos serão similares, podendo ser observados na Figura 15.

Figura 15. Movimentos de um vagão.

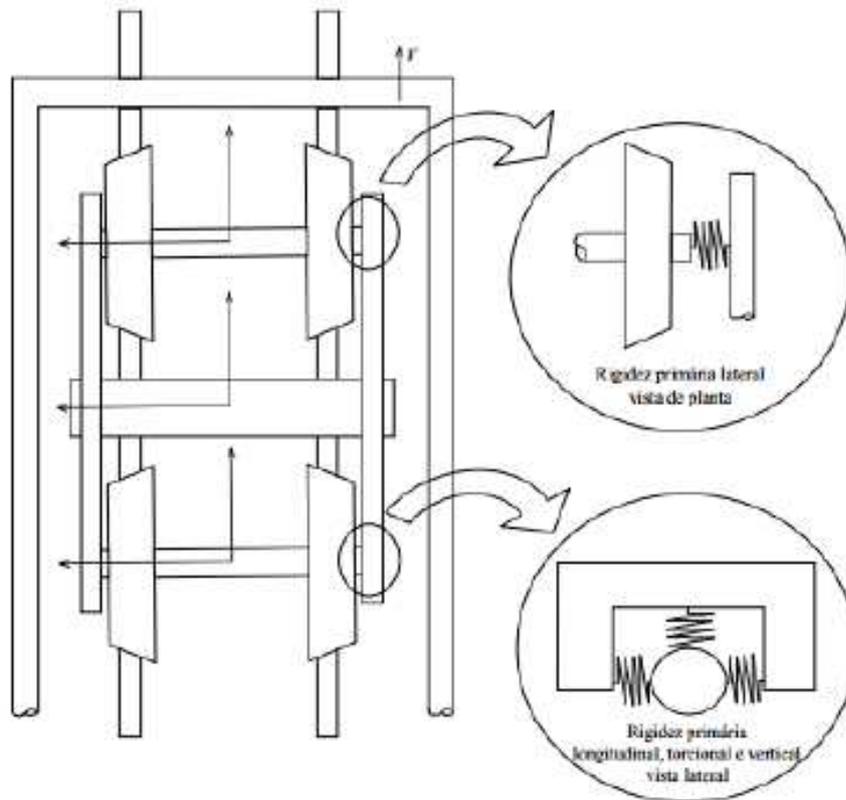


Fonte: (MAXION, 2009)

O rodeiro exerce uma função extremamente importante, uma vez que ele é o responsável por sustentar todo o peso do veículo.

Levando-se em consideração de que todos os rodeiros estão fixos em uma estrutura H rígida, que pode ser observada através da Figura 16.

Figura 16. Truque com dois rodeiros e quatro suspensões primárias.



Fonte: (MAXION, 2009)

Tal estrutura H fornece um maior controle para que os rodeiros não oscilem lateralmente em relação aos outros, acarretando no efeito conhecido como *hunting*.

Pode-se observar na Figura 16 que a suspensão primária está conectada tanto ao rodeiro quanto a estrutura H.

3. MODELO ANALÍTICO DA MOLA

Será abordado neste capítulo, todo o modelo analítico da mola que está sendo utilizada como objeto de estudo, todavia antes de realizar tal atividade, necessita-se de alguns dados em adicional.

No item 3.1 será apresentado o veículo do qual pode ser encontrado a mola que está sendo analisada.

Através do item 3.2, serão revisadas todas as características do material da mola, juntamente com as cotas da mesma.

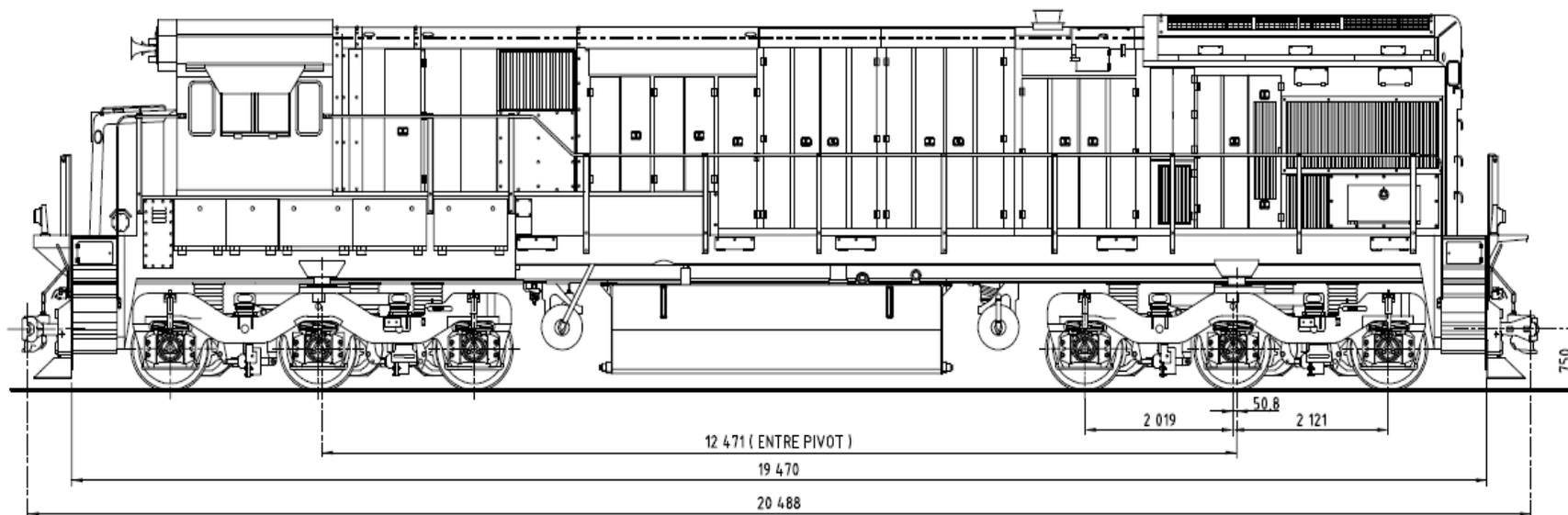
Em seguida, no item 3.3, será realizada a análise analítica em si, utilizando equações que auxiliem a obtenção da tensão aplicada e a deformação na mola em uma análise estática.

Por final, no item 3.4 serão analisados os resultados obtidos com dados do material e com um modelo real da mola.

3.1. Locomotiva C30-7

A locomotiva C30-7 é fabricada pela GE, podendo ser encontrada operando em diversas concessionárias ao redor do país, tanto em bitola larga quanto métrica, as cotas deste veículo podem ser observadas através das Figuras 17 e 18.

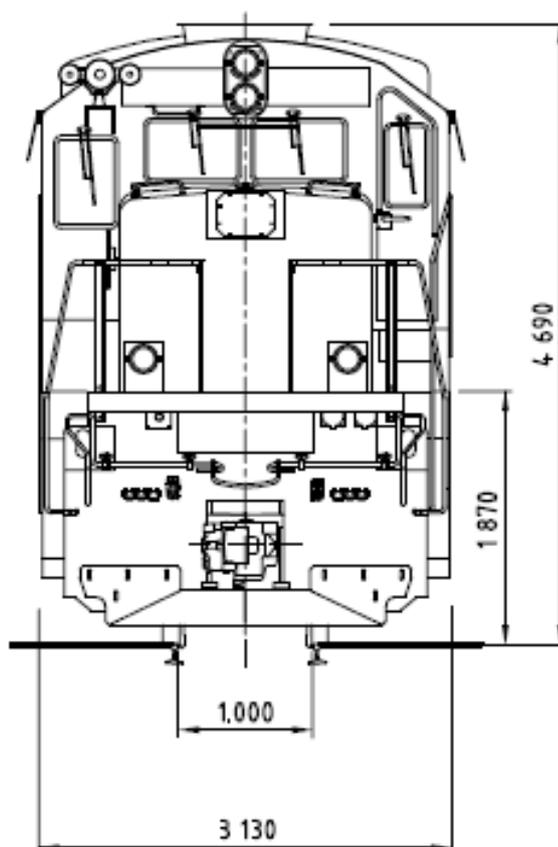
Figura 17. Cotas da vista lateral da locomotiva C30-7.



Fonte: (ALL, 2004)

Pode-se observar através da Figura 17 que esta locomotiva possui 20,488 metros de comprimento total, 12,471 metros de distância entre pivot e 2,019 metros de distância entre centro de rodeiros.

Figura 18. Cotas da vista frontal da locomotiva C30-7.



Fonte: (ALL, 2004)

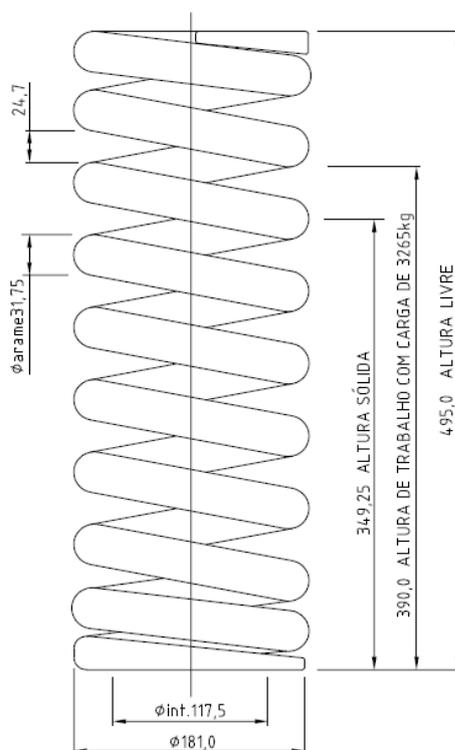
Através da Figura 18 pode-se observar que esta locomotiva é utilizada em bitola métrica, possui uma largura total de 3,130 metros e uma altura de 4,690 metros.

Demais dados da locomotiva C30-7 seguem no Anexo A.

3.2. Mola externa da caixa de rolamento da locomotiva C30-7

A mola de estudo está localizada na caixa externa de rolamento, que foi apresentada na Figura 8, também pode ser observada através da Figura 19, todavia agora com as cotas deste elemento.

Figura 19. Cotas da mola externa da caixa de rolamento.



Fonte: (ALL, 2005)

Pode-se observar através da Figura 19, que a mola possui uma altura livre de 495,00 mm, altura de trabalho de 390,00 mm, altura sólida 349,25 mm, diâmetro externo 181,00mm, diâmetro interno 117,50 mm.

Em adicional, o diâmetro do arame é 31,75 mm e pitch de 56,45 mm, uma vez que esta medida é dada através dos centros de dois arames, por fim, ao aplicar uma carga de 32029.65 N, a mola irá deslocar 105,00 mm.

O material utilizado na fabricação desta mola é o SAE 5160, tendo um módulo de elasticidade transversal de 83,00 GPa, como pode ser observado no Anexo C.

A Tabela 2, contendo algumas características adicionais deste material.

Tabela 2. 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
Austemperado	870-936	982-1056	24,7-25,9	45-49

Fonte: (COUTO, 2007)

Deve-se levar em consideração que o aço que está sendo utilizado é do tipo temperado e revenido.

Demais dados relacionados à mola podem ser observados através dos Anexos B e C.

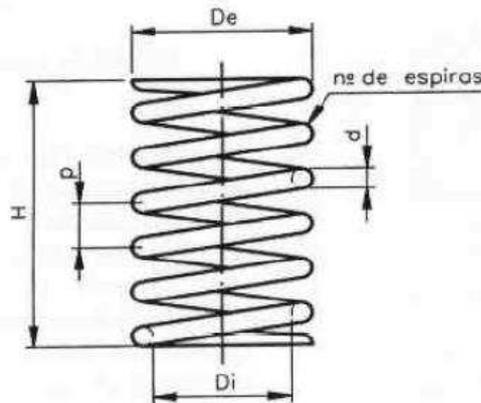
3.3. Modelo analítico da mola

Qualquer elemento mecânico, metálico ou não, pode ser considerado uma mola, visto que todos respondem elasticamente num pequeno intervalo de sollicitação.

A Hipótese de distribuição uniforme de tensões é frequentemente aventada em projeto, onde que o resultado é então conhecido como tração pura, compressão pura ou cisalhamento puro (SHIGLEY, 2007).

Deve-se levar em consideração que a mola C30-7 é uma mola helicoidal puramente de compressão, pode-se observar tal mola através da Figura 20.

Figura 20. Variáveis de uma mola helicoidal.



Fonte: (ARCANJO, 2008)

A mola é considerada um elemento linear elástico quando sua deformação for diretamente proporcional à força aplicada, obedecendo, portanto à lei de *Hooke*, que segue na Equação 1 (ARCANJO, 2008).

$$F = k \delta \quad (1)$$

O deslocamento dentre as extremidades é dado pela Equação 2.

$$\delta = y_1 - y_2 \quad (2)$$

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 momento de torção, segue a Equação 3.

$$T = \frac{F \cdot Dm}{2} \quad (3)$$

Sendo que diâmetro médio obedece a Equação 4.

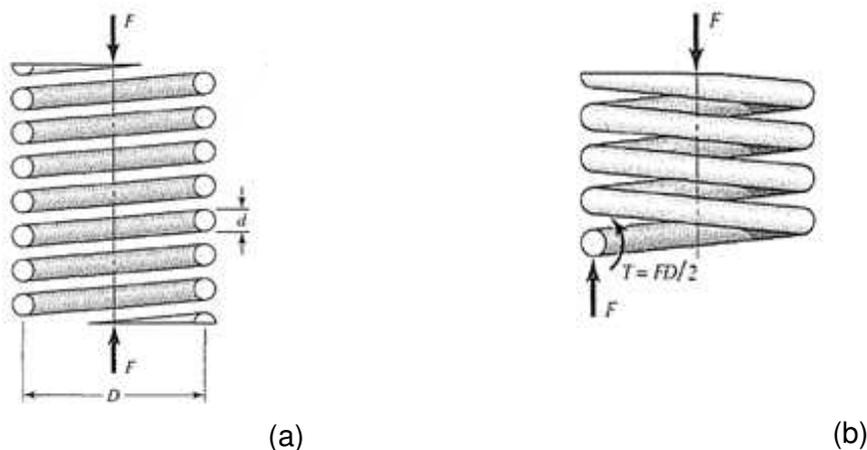
$$Dm = \frac{(De + Di)}{2} \quad (4)$$

Substituindo os dados tem-se:

$$D_m = \frac{(181 + 117,5)}{2} = 149,25 \text{ mm} \quad (5)$$

A Figura 21 representa os esforços dos quais uma mola helicoidal de compressão está sujeita ao ser aplicada uma carga F .

Figura 21. (a) Mola helicoidal carregada longitudinalmente, (b) diagrama de corpo livre mostrando que o fio está sujeito a um cisalhamento direto e outro de torção.



Fonte: (SHIGLEY, 2007)

A tensão máxima na mola segue a Equação 6.

$$\tau_m = \frac{T \cdot r}{J} + \frac{F}{A} \quad (6)$$

A Equação 6 baseia-se em um fio reto, todavia a curvatura do fio aumenta a tensão no lado interno da mola, diminuindo do lado externo, sendo essa tensão de curvatura importante para fadiga (SHIGLEY, 2007).

Onde que momento e inércia é dado pela Equação 7.

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \quad (7)$$

Deve-se também adicionar o fator corretivo de curvatura, sendo assim a tensão máxima na mola ficará ser calculada através da Equação 8.

$$\tau_m = KB \left(\frac{T r m}{J} + \frac{F}{A} \right) \quad (8)$$

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 9 (SHIGLEY, 2007):

$$K_b = \frac{4C + 2}{4C - 3} \quad (9)$$

Para obter a tensão de cisalhamento, utiliza-se a Equação 10.

$$\tau = K_b \frac{8.F.D}{\pi.d^3} \quad (10)$$

O índice da mola geralmente está entre quatro e doze para molas helicoidais de compressão para serviço estático, podendo ser calculado pela Equação 11 (SHIGLEY, 2007):

$$C = \frac{Dm}{d} \quad (11)$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$C = \frac{149,25 (10^{-3})}{31,75 (10^{-3})} = 4,7007874 \quad (12)$$

Substituindo os valores na Equação 9, tem-se:

$$K_b = \left(\frac{4 (4,70) + 2}{4 (4,70) - 3} \right) \quad (13)$$

Resultando em:

$$K_b = 1,3164 \quad (14)$$

Substituindo este valor obtido na Equação 10, tem-se

$$\tau = (1,3164) \frac{8 (32029,65) (149,25 (10^{-3}))}{\pi (31,75 (10^{-3}))^3} \quad (15)$$

Resultando em:

$$\tau = 500,696 \text{ MPa} \quad (16)$$

Para o cálculo da deformação da mola, tem-se a Equação 17.

$$d\delta = rm \, d\theta \quad (17)$$

Levando em consideração que $d\theta$ é dada pela Equação 18

$$d\theta = \frac{T}{GJ} \, dx \quad (18)$$

Substituindo $d\theta$ na Equação 17, tem-se a Equação 19

$$d\delta = rm \frac{T}{GJ} \, dx \quad (19)$$

Sendo que para uma espira, a derivada em x é dada pela Equação 20.

$$dx = rm \, d\varphi \quad (20)$$

Levando em consideração que φ é calculado pela Equação 21.

$$\varphi = 2\pi \quad (21)$$

Substituindo a Equação 21 na Equação 20 e posteriormente a Equação 20 na Equação 19, tem-se:

$$d\delta = rm \frac{T}{GJ} \, rmd\varphi \quad (22)$$

Aplicando integral em ambos os lados:

$$\delta = \int_0^{2\pi} \left(r m^2 \frac{T}{G J} \right) d\varphi \quad (23)$$

Integrando:

$$\delta = r m^2 \frac{T}{G J} 2\pi \quad (24)$$

Aplicando as substituições, obtém-se a Equação 25.

$$\delta = \frac{8 F D m^3}{G d^4} N \quad (25)$$

Substituindo os parâmetros variáveis tem-se:

$$\delta = 0,101 \text{ m} = 101,00 \text{ mm} \quad (26)$$

3.4. Análise dos resultados

Através do equacionamento realizado no item 3.3, foi possível obter dados da tensão e deformação obtidos na análise estática da mola.

A tensão obtida foi de aproximadamente 500 MPa, sendo que a tensão de escoamento do material está entre 672 a 758 MPa, conforme Tabela 2, dessa forma pode-se concluir que a tensão calculada está de acordo com as exigências ao material.

Por final, a deformação calculada, foi de 101,00 mm, levando em consideração a Figura 19 que apresenta o caso real da mola, que desloca cerca de 105,00 mm, pode-se afirmar que se obteve um bom resultado na análise.

4. MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta numérico-computacional utilizada para a solução aproximada de equações diferenciais (RIBEIRO, 2007).

Este método resolve equações diferenciais parciais, onde que são criadas fórmulas fracas para obtenção de um resultado final aproximado do resultado real (FISH, 2007).

Em adicional, o MEF geralmente é utilizado para resolver problemas de engenharia, tais como comportamentos em sistemas elétricos, mecânicos e térmicos (BETTAZZI, 2013).

Através do MEF, pode-se resolver qualquer problema susceptível de ser representado matematicamente por equações derivadas parciais, com quaisquer condições de fronteira (ZIENKIEWICZ, 1988).

4.1. Fundamentos do MEF em 3D

Considerando-se um Ω , delimitado por uma Γ , em um sistema de eixo cartesianos, sendo que Γ_t é a parte da fronteira onde é imposta a tensão e Γ_u a parte complementar, onde são impostos os deslocamentos (JOSÉ, 1996).

Deve-se levar em consideração que o material está sendo analisado é isotrópico e que as hipótese de linearidade física e geométrica são mantidas.

Dessa forma, o material deve possuir propriedades físicas iguais em todas as direções, ter uma relação linear entre tensões e deformações e os deslocamentos obtidos são consideravelmente menores que a dimensão do corpo.

O problema fundamental da elasticidade consiste em determinar os campos de deslocamento, deformações e tensões em um Ω , sendo que já são

conhecidas as forças os deslocamentos na fronteira cinemática, Γ_u , e a tensão na fronteira estática, Γ_t .

Inicialmente, tem-se que o deslocamento em cada ponto do Ω , pode ser representado por um vetor u , que segue a Equação 27.

$$u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (27)$$

Sendo o estado de deformação em cada ponto dado pela Equação 28:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Usualmente define-se $\gamma_{ij} = 2 \varepsilon_{ij}$, dessa forma tem-se a Equação 29:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Sendo as relações entre as deformações e deslocamentos dado pela Equação 30:

$$\varepsilon = diu \quad (30)$$

De tal forma que o operador diferencial de compatibilidade, definido pela Equação 31:

$$di = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (31)$$

O vetor de forças é dado pela Equação 32:

$$F = \begin{bmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{bmatrix} \quad (32)$$

Onde que o estado de tensão pode ser apresentado pela Equação 33:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Em virtude de ter sido adotado a condição de linearidade geométrica, pode-se concluir que o tensor das tensões é simétrico, sendo assim tem-se a Equação 34:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} \quad (34)$$

As equações de equilíbrio de forças de um elemento infinitesimal no interior do Ω podem ser escritas matricialmente na forma Equação 35:

$$d^* \sigma + F = 0 \quad (35)$$

Sendo d^* , dado pela Equação 36:

$$d^* = d^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (36)$$

A Γ em um Ω , é dividida em duas partes, fronteiras dinâmica e estática, sendo a primeira impõem-se os valores dos deslocamentos dados pela Equação 37:

$$u = u\Gamma \quad (37)$$

Já no caso estático, impõem-se a tensão, resultando na Equação 38:

$$N\sigma = t\Gamma \quad (38)$$

Pode-se obter N através da Equação 39.

$$N = \begin{bmatrix} nx & 0 & 0 & ny & nz & 0 \\ 0 & ny & 0 & nx & 0 & nz \\ 0 & 0 & nz & 0 & nx & ny \end{bmatrix} \quad (39)$$

As relações constitutivas estabelecem a lei que relaciona as tensões e deformações, em termo de flexibilidade ou rigidez, sendo que para o primeiro caso, tem-se a Equação 40:

$$\varepsilon = f\sigma + \varepsilon\theta \quad (40)$$

Sendo que f para um material isotrópico, dada pela Equação 41:

$$f = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (41)$$

Já para o segundo caso, levando em consideração os termos de rigidez, tem-se a Equação 42:

$$\sigma = k \varepsilon - k \varepsilon \theta \quad (42)$$

Sendo que k é definido pela Equação 43:

$$k \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Fazendo uso das Equações 30 e 42, é possível escrever a Equação 36, em função dos deslocamentos, obtendo-se, portanto a Equação 45:

$$d^* k di u - d^* k \varepsilon \theta + f = 0 \quad (44)$$

A partir das equações 30, 35 e 42, podem-se obter as condições de fronteira estática em termos dos deslocamentos, dadas pela Equação 45:

$$N k di u - N k \varepsilon \theta = t \Gamma \quad (45)$$

A Equação 45 proporciona uma redução do número de incógnitas e de equações do problema, ou seja, pode ser considerada a fórmula fraca para a resolução do problema de MEF.

4.2. Aplicação do MEF

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

1. Pré-processamento (1);
2. Formulação do elemento (2);

3. Obtenção das equações (3);
4. Resolução das equações (4);
5. Pós-processamento (5).

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.

4.3. Análise numérica

Nesta etapa será abordada a simulação da aplicação de carga na mola apresentada na Figura 19, sendo que a resolução do problema será realizada através de um software livre, levando em consideração as etapas mencionadas na aplicação do MEF.

4.3.1. Geração do modelo físico

As variáveis inseridas no software seguem as cotas do Anexo B, onde que também podem ser observadas através da Tabela 3.

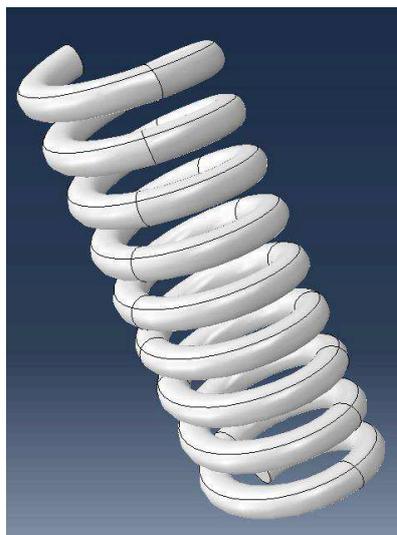
Tabela 3. Variáveis da mola C30-7 inserida no software

Variável	Valor
De	181,00 mm
Di	117,50 mm
H	495,00 mm
ρ	24,70 mm
d	31,75 mm
G	83GPa
E	215,8Gpa
ν	0,3
F	32029,65 N

Fonte: (Do autor)

Com os dados da Tabela 3, foi possível gerar um modelo físico da mola, conforme segue na Figura 22.

Figura 22. Modelo físico da mola gerado no software.



Fonte: (Autoria Própria)

4.3.2. Escolha das propriedades do material

As propriedades do material foram mantidas as mesmas das já mencionadas nos capítulos anteriormente de tal forma que se pode observar tais dados adicionados no software, através da Figura 23.

Figura 23. Propriedades mecânicas do material SAE 5160

Name: Aço SAE 5160

Description: [Edit...]

Material Behaviors

- Elastic

General Mechanical Thermal Other [Delete]

Elastic

Type: Isotropic [Suboptions]

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

No compression

No tension

Data

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	215800000000	0.3

[OK] [Cancel]

Fonte: (Autoria Própria)

Conforme a Figura 23, pode-se observar que o módulo de young é de 215,8 GPa e o coeficiente de poisson de 0,3.

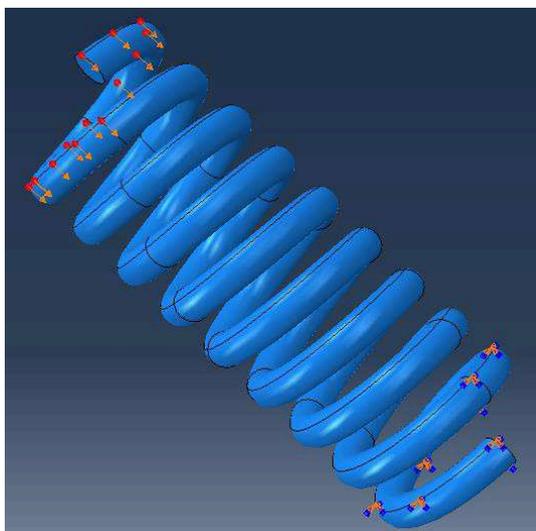
4.3.3. Aplicação de cargas e condições de contorno

As cargas e condições de contorno do modelo a ser analisado, são de extrema importância, visto que estes são quem 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 26,

onde que a aplicação das forças e as condições podem ser observadas na Figura 24.

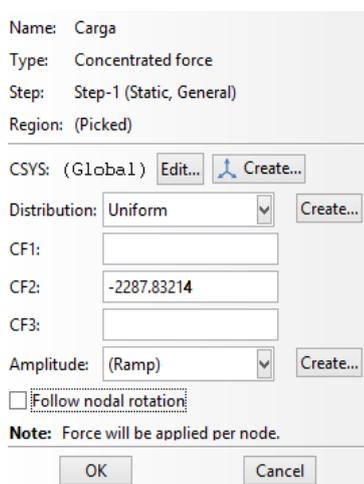
Figura 24. Aplicação de carga e condições de contorno no modelo.



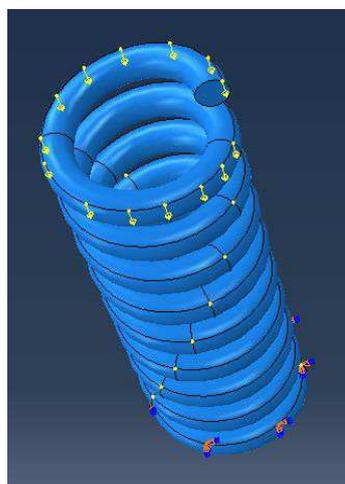
Fonte: (Autoria Própria)

A carga aplicada segue a mesma do que foi apresentado na Figura 19, todavia ao invés de estar em kgf está em N, sendo também que a carga foi dividida ao longo dos diversos nós criados onde que se pode observar através da Figura 25.

Figura 25. Carga aplicada na mola (a) tela de adição da força e (b) cargas adicionadas



(a)



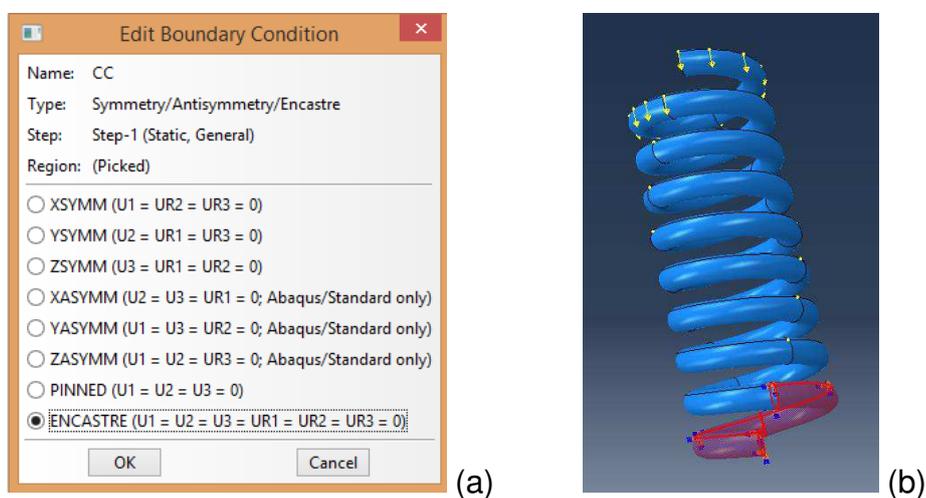
(b)

Fonte: (Autoria Própria)

Pode-se observar através da Figura 25 que a carga inicial de 32,02965 kN foi dividida em quatorze nós, ficando cada nó com uma carga concentrada de 2,28783 kN.

Para a aplicação das condições de contorno da mola, não foram necessárias nenhuma criação de nós adicionais, como pode ser observado na Figura 26.

Figura 26. Aplicação das condições de contorno (a) tela de adição das condições de contorno e (b) regiões da condições



Fonte: (Autoria Própria)

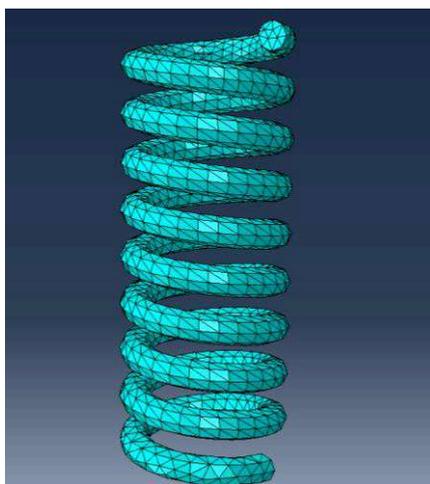
Pode-se observar através da Figura 26 que a região inferior da mola foi toda engastada, de tal maneira que a mola fica-se fixa, ou seja, deslocamento e rotação nula para todas as direções nas regiões selecionadas.

4.3.4. Geração da malha

Para a geração da malha foram utilizados elementos tetraédricos, com fator de forma de 0,6307 foi feito uso deste tipo de elemento, pois eles são elementos simples e proporcionam bons resultados em estruturas cilíndricas.

A mola foi dividida em 4719 elementos, sendo que cada elemento ficou com um volume de 708 mm³, pode-se observar o modelo gerado através da Figura 27.

Figura 27. Malha gerada da mola.



Fonte: (Autoria Própria)

Foram gerados diversos tipos de malham, todavia observou-se que os resultados estavam convergindo para o modelo demonstrado na Figura 27.

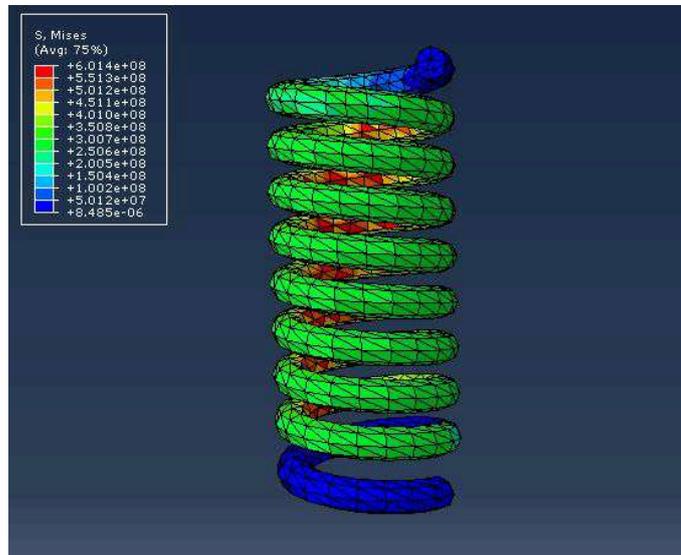
A malha gerada aliou a precisão da resposta com a capacidade computacional, uma vez que quanto menor o tamanho do elemento, mais complexa será a análise.

4.3.5. 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 28.

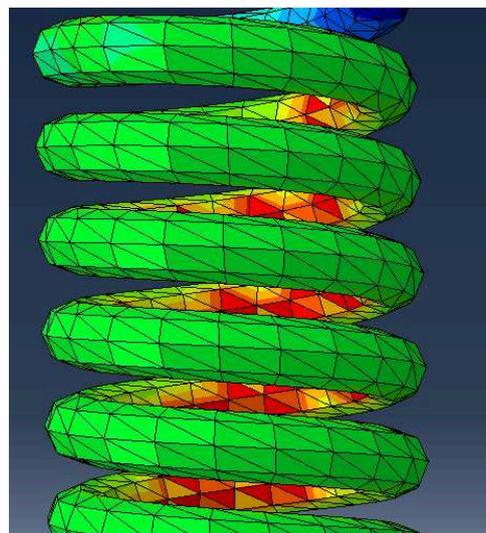
Figura 28. Tensão Von Mises obtida da simulação da mola.



Fonte: (Autoria Própria)

Pode-se observar através da Figura 28 que a maior tensão obtida foi de $6,014 \times 10^8$, ou seja, 601,4 MPa, onde que as regiões que se encontram com essa tensão, são demonstradas na Figura 29.

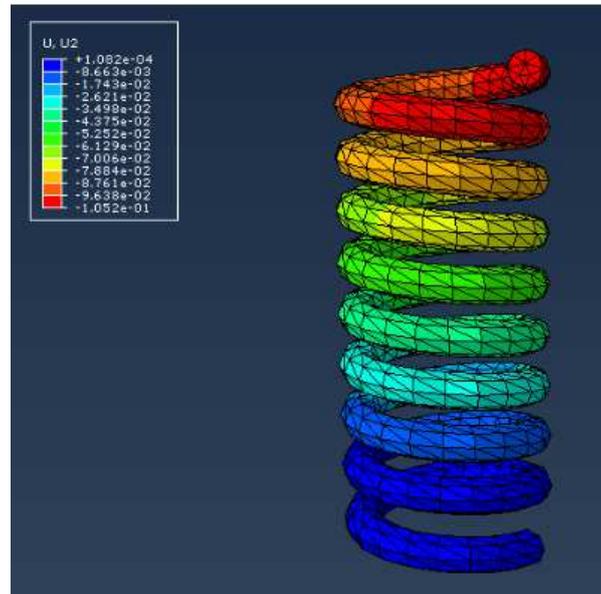
Figura 29. Região de maior tensão da mola.



Fonte: (Autoria Própria)

O deslocamento também obtido da simulação pode ser observado através da Figura 30.

Figura 30. Deslocamento em y, obtido da simulação da mola.

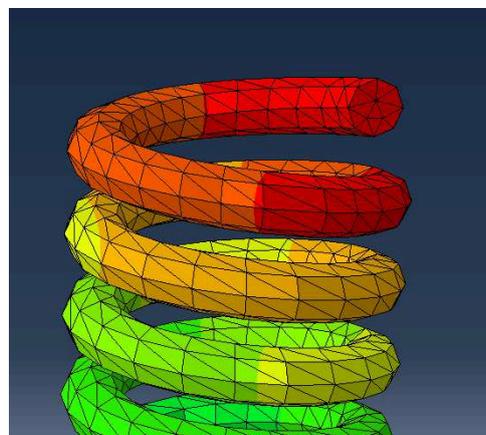


Fonte: (Autoria Própria)

Pode-se observar através da Figura 30 que o deslocamento máximo obtido foi de $-1,052E-1$, sendo negativo visto que o deslocamento é no sentido inverso do eixo, dessa forma o deslocamento será de $0,1052$ m, ou seja, $105,2$ mm.

Em adicional a Figura 31 representa os locais que obtiveram maiores deslocamentos na análise.

Figura 31. Região com os maiores deslocamento na mola.



Fonte: (Autoria Própria)

4.4. Análise dos resultados

Com a realização da análise numérica no item 4.3, 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 601,4 MPa, ao comparar esta tensão com o limite de escoamento do material, pode-se concluir que obteve-se um bom resultado.

Levando em consideração a tensão calculada no item 3.3, teve um desvio de 100 MPa, todavia continua sendo um resultado válido, visto que no modelo analítico foram desconsiderados alguns termos e feitos alguns arredondamentos.

Por final, a deformação na mola foi de 105,2 mm, dessa forma comparando esse resultado com os dados reais e o modelo analítico, pode-se afirmar que a simulação foi devidamente realizada, havendo pouca divergência.

5. CONCLUSÃO

Um estudo estático da mola foi realizado ao longo do trabalho, tanto em análise analítica, quanto numérica, a fim de obter dados de tensão e deformação do material em operação.

Através do item 3.3 foi realizar todo o equacionamento voltado para a análise analítica, já o item 4.3 abordou toda a análise numérica.

A tensão obtida analiticamente foi de 500 MPa, já numericamente foi de 601,4 MPa, comparando estas tensões com o limite de escoamento do material que é está entre 672 MPa e 758 MPa, pode-se afirmar que ambas as tensões estão dentro do limite aceitável.

Sendo a deformação obtida analiticamente de 101,00 mm e numericamente de 105,20 mm, comparando ambas com o dado real apresentado pela Figura 19, que é de 105,00 mm é plausível argumentar que as a análise em ambos os casos devidamente precisa e muito próximo uma da outra.

Em adicional comparando os três alongamentos com a taxa de deformação do material, através da Tabela 2 que está entre 22,7 - 23,9%, conclui-se que todos os dados mencionados acima estão dentre este padrão.

Por fim, vale ressaltar o sucesso obtido através de ambos os métodos abordados, fornecendo resultados muito próximos dos reais.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTUROS

A análise estática realizada no estudo em questão obteve um bom resultado para ambos os casos, analítico e numérico. Todavia, levando em consideração a operação de um veículo ferroviário, necessita-se também abordar a análise dinâmica.

Através da análise dinâmica, seriam realizadas outras simulações contendo tensões alternadas, carregamentos cíclicos e médios.

A realização de uma análise de falhas é de grande importância para estudos voltados aos sistemas de suspensão, desta forma, realizar um estudo das falhas em molas, seria uma das futuras continuidades do trabalho em questão.

Por final, os resultados do trabalho proposto em adicional com os trabalhos futuros poderão ser utilizados em melhorias para o sistema de suspensão, em estudos voltados a acústica veicular, visando a diminuição dos efeitos vibratórios e ruídos do veículo ferroviário.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCANJO, E.P., 2008. “**Caracterização do Comportamento à Fadiga de Molas**”. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa – PT.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS, 2010. “**Balço do Transporte Ferroviário de Carga**”. Brasília, Brasil 2011 15p.
- BARBIERI, A.C.; SILVA, M.J.D.; AGNELLI, N., 2003 “**Gestão estatal versus gestão privada: O caso das ferrovias brasileiras**”. Em *Simpósio de Engenharia de Produção - SIMPEP, 2003*. Bauru - SP.
- BETTAZZI, G.C., 2003. “**Análise da Força Longitudinal Devida à Frenagem Considerada Pela NBR7187**” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador - BA.
- BORBA, J., 2009. “**Mecânica de Locomotiva**”. Volume 2. Pontifícia Universidade Católica: Minas Gerais, v. 2, p. 1 – 86, 2009.
- BRANCO, C.M., 2006. “**Mecânica dos Materiais**”. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa – Portugal.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2013. “**O Sistema Ferroviário Brasileiro: Transporte e Economia**”. Brasília, Brasil, 2013. 58 p.
- 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.
- DAKHORE, M., BISSA, B., 2013. “**Failure Analysis of Locomotive Suspension Coil Spring Using Finite Element Analysis**”. Em Journal of Reserarch in Management and Technology. Vol 2, p. 96 – 104.

DOMINGUES, N.I.J., 2011. **“Estudo do Comportamento Mecânico da Liga Al-Cu 2024 Solubilizada e Envelhecida para Aplicações Aeronáuticas”**. Dissertação de Mestrado, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo – SP.

FISH, J., BELYTSCHKO, T., 2007. **“A First Course In Finite Elements”**. England, Wiley, 344 p.

GHATE, P.; SHANKAPAL, S.R.; GOWDA, M.H., 2012. **“Failure Investigation of a Freight Locomotive Suspension Spring and Redesign of the spring for Durability and ride index”**. *SASTech Journal*, Bangalore, Vol. 11, n. 2, p. 23-29.

JOSÉ, O.B., 1996. **“Utilização de Elementos Finitos de Equilíbrio em Refinamento Adaptativo”**. Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa – PT.

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.

MAXION. **“Modelagem do Veículo Ferroviário em Multicorpos”**. Revista Ferroviária, v. 1, p.1 – 12, 2009.

REDDY, M.S.; MADHUSUDHAN, B., 2013. **“The Study of Premature Failure of Spring Used in Railway”**. Jntu Annapur, Índia. v. 8, p. 1 – 28.

RIBEIRO, J., SANTOS, A.S., BELMONTE. G.J., 2007. **“Aplicação à Análise Mecânica de Estruturas e Componentes”**. Apostila do curso de Introdução ao Método dos Elementos Finitos. Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA.

SILVA, J.E.G., 2006. **“Utilização de Locomotivas com Motores de Tração AC para Auxílio na Serra do Mar”**. Trabalho de conclusão de curso, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro - RJ.

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, C.R., BUDYNAS, R.G. **“Projeto de Engenharia Mecânica”** Bookman; 7ª. Ed; 2005. 957 p.

VILAÇA, R., 2013. **“Transporte Ferroviário de Cargas no Brasil: As Concessionárias do Transporte Ferroviário de Carga”**. Em *Seminário Ferrovias*. Brasília – DF, v. 1, p. 1 - 41.

ZIENKIEWICZ, O.C., TAYLOR, R.L., 1988. **“The Finite Element Method”**. Vol. 1, 4^o. Ed.

ANEXO B.- Material da mola da caixa externa de rolamento da locomotiva C30-7, fornecido pela empresa ALL

RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIES			
CLASS. (mm)	CLASS. (μm)	CLASS. (μm)	CLASS. (μm)
0,1	0,1	0,1	0,1
0,2	0,2	0,2	0,2
0,4	0,4	0,4	0,4
0,8	0,8	0,8	0,8
1,6	1,6	1,6	1,6
3,2	3,2	3,2	3,2
6,3	6,3	6,3	6,3
12,5	12,5	12,5	12,5
25	25	25	25
50	50	50	50
100	100	100	100
200	200	200	200
400	400	400	400
800	800	800	800
1600	1600	1600	1600
3200	3200	3200	3200
6400	6400	6400	6400
12800	12800	12800	12800
25600	25600	25600	25600
51200	51200	51200	51200
102400	102400	102400	102400
204800	204800	204800	204800
409600	409600	409600	409600
819200	819200	819200	819200
1638400	1638400	1638400	1638400
3276800	3276800	3276800	3276800
6553600	6553600	6553600	6553600
13107200	13107200	13107200	13107200
26214400	26214400	26214400	26214400
52428800	52428800	52428800	52428800
104857600	104857600	104857600	104857600
209715200	209715200	209715200	209715200
419430400	419430400	419430400	419430400
838860800	838860800	838860800	838860800
1677721600	1677721600	1677721600	1677721600
3355443200	3355443200	3355443200	3355443200
6710886400	6710886400	6710886400	6710886400
13421772800	13421772800	13421772800	13421772800
26843545600	26843545600	26843545600	26843545600
53687091200	53687091200	53687091200	53687091200
107374182400	107374182400	107374182400	107374182400
214748364800	214748364800	214748364800	214748364800
429496729600	429496729600	429496729600	429496729600
858993459200	858993459200	858993459200	858993459200
1717986918400	1717986918400	1717986918400	1717986918400
3435973836800	3435973836800	3435973836800	3435973836800
6871947673600	6871947673600	6871947673600	6871947673600
13743895347200	13743895347200	13743895347200	13743895347200
27487790694400	27487790694400	27487790694400	27487790694400
54975581388800	54975581388800	54975581388800	54975581388800
109951162777600	109951162777600	109951162777600	109951162777600
219902325555200	219902325555200	219902325555200	219902325555200
439804651110400	439804651110400	439804651110400	439804651110400
879609302220800	879609302220800	879609302220800	879609302220800
1759218604441600	1759218604441600	1759218604441600	1759218604441600
3518437208883200	3518437208883200	3518437208883200	3518437208883200
7036874417766400	7036874417766400	7036874417766400	7036874417766400
14073748835532800	14073748835532800	14073748835532800	14073748835532800
28147497671065600	28147497671065600	28147497671065600	28147497671065600
56294995342131200	56294995342131200	56294995342131200	56294995342131200
112589990684262400	112589990684262400	112589990684262400	112589990684262400
225179981368524800	225179981368524800	225179981368524800	225179981368524800
450359962737049600	450359962737049600	450359962737049600	450359962737049600
900719925474099200	900719925474099200	900719925474099200	900719925474099200
1801439850948198400	1801439850948198400	1801439850948198400	1801439850948198400
3602879701896396800	3602879701896396800	3602879701896396800	3602879701896396800
7205759403792793600	7205759403792793600	7205759403792793600	7205759403792793600
14411518807585587200	14411518807585587200	14411518807585587200	14411518807585587200
28823037615171174400	28823037615171174400	28823037615171174400	28823037615171174400
57646075230342348800	57646075230342348800	57646075230342348800	57646075230342348800
115292150460684697600	115292150460684697600	115292150460684697600	115292150460684697600
230584300921369395200	230584300921369395200	230584300921369395200	230584300921369395200
461168601842738790400	461168601842738790400	461168601842738790400	461168601842738790400
922337203685477580800	922337203685477580800	922337203685477580800	922337203685477580800
1844674407370955161600	1844674407370955161600	1844674407370955161600	1844674407370955161600
3689348814741910323200	3689348814741910323200	3689348814741910323200	3689348814741910323200
7378697629483820646400	7378697629483820646400	7378697629483820646400	7378697629483820646400
14757395258967641292800	14757395258967641292800	14757395258967641292800	14757395258967641292800
29514790517935282585600	29514790517935282585600	29514790517935282585600	29514790517935282585600
59029581035870565171200	59029581035870565171200	59029581035870565171200	59029581035870565171200
118059162071741130342400	118059162071741130342400	118059162071741130342400	118059162071741130342400
236118324143482260684800	236118324143482260684800	236118324143482260684800	236118324143482260684800
472236648286964521369600	472236648286964521369600	472236648286964521369600	472236648286964521369600
944473296573929042739200	944473296573929042739200	944473296573929042739200	944473296573929042739200
1888946593147858085478400	1888946593147858085478400	1888946593147858085478400	1888946593147858085478400
3777893186295716170956800	3777893186295716170956800	3777893186295716170956800	3777893186295716170956800
7555786372591432341913600	7555786372591432341913600	7555786372591432341913600	7555786372591432341913600
15111572745182864683827200	15111572745182864683827200	15111572745182864683827200	15111572745182864683827200
30223145490365729367654400	30223145490365729367654400	30223145490365729367654400	30223145490365729367654400
60446290980731458735308800	60446290980731458735308800	60446290980731458735308800	60446290980731458735308800
120892581961462917470617600	120892581961462917470617600	120892581961462917470617600	120892581961462917470617600
241785163922925834941235200	241785163922925834941235200	241785163922925834941235200	241785163922925834941235200
483570327845851669882470400	483570327845851669882470400	483570327845851669882470400	483570327845851669882470400
967140655691703339764940800	967140655691703339764940800	967140655691703339764940800	967140655691703339764940800
1934281311383406679529881600	1934281311383406679529881600	1934281311383406679529881600	1934281311383406679529881600
3868562622766813359059763200	3868562622766813359059763200	3868562622766813359059763200	3868562622766813359059763200
7737125245533626718119526400	7737125245533626718119526400	7737125245533626718119526400	7737125245533626718119526400
15474250491067253436239052800	15474250491067253436239052800	15474250491067253436239052800	15474250491067253436239052800
30948500982134506872478115200	30948500982134506872478115200	30948500982134506872478115200	30948500982134506872478115200
61897001964269013744956230400	61897001964269013744956230400	61897001964269013744956230400	61897001964269013744956230400
123794003928538027489912460800	123794003928538027489912460800	123794003928538027489912460800	123794003928538027489912460800
247588007857076054979824921600	247588007857076054979824921600	247588007857076054979824921600	247588007857076054979824921600
495176015714152109959649843200	495176015714152109959649843200	495176015714152109959649843200	495176015714152109959649843200
990352031428304219919399686400	990352031428304219919399686400	990352031428304219919399686400	990352031428304219919399686400
1980704062856608439798799372800	1980704062856608439798799372800	1980704062856608439798799372800	1980704062856608439798799372800
3961408125713216879597598745600	3961408125713216879597598745600	3961408125713216879597598745600	3961408125713216879597598745600
7922816251426433759195197491200	7922816251426433759195197491200	7922816251426433759195197491200	7922816251426433759195197491200
15845632502852867518390394982400	15845632502852867518390394982400	15845632502852867518390394982400	15845632502852867518390394982400
31691265005705735036780789964800	31691265005705735036780789964800	31691265005705735036780789964800	31691265005705735036780789964800
63382530011411470073561579929600	63382530011411470073561579929600	63382530011411470073561579929600	63382530011411470073561579929600
126765060022822940147123159859200	126765060022822940147123159859200	126765060022822940147123159859200	126765060022822940147123159859200
253530120045645880294246319718400	253530120045645880294246319718400	253530120045645880294246319718400	253530120045645880294246319718400
507060240091291760588492639436800	507060240091291760588492639436800	507060240091291760588492639436800	507060240091291760588492639436800
1014120480182583521176985278873600	1014120480182583521176985278873600	1014120480182583521176985278873600	1014120480182583521176985278873600
2028240960365167042353970557747200	2028240960365167042353970557747200	2028240960365167042353970557747200	2028240960365167042353970557747200
4056481920730334084707941115494400	4056481920730334084707941115494400	4056481920730334084707941115494400	4056481920730334084707941115494400
8112963841460668169415882230988800	8112963841460668169415882230988800	8112963841460668169415882230988800	8112963841460668169415882230988800
16225927682921336388831764461977600	16225927682921336388831764461977600	16225927682921336388831764461977600	16225927682921336388831764461977600
32451855365842672777663528923955200	32451855365842672777663528923955200	32451855365842672777663528923955200	32451855365842672777663528923955200
64903710731685345555327057847910400	64903710731685345555327057847910400	64903710731685345555327057847910400	6490371073168534555532705

ANEXO C - Material da mola do ajustador de folga, fornecido pela empresa Knorr-Bremse

1	2	3	4
<p>Da = 87,80 ±0,5 mm</p> <p>Dm = 77,50 ±0,5 mm</p> <p>Di = 66,80 ±0,5 mm (03)</p> <p>d = 10,50 ± mm</p> <p>If = 21</p> <p>Ig = 19,5</p> <p>Sentido de Enrolamento <input checked="" type="radio"/> à direita <input type="radio"/> à esquerda</p> <p>Nas extremidades, última espira encostada na anterior e retificada para aproximadamente 1/4 d, perpendicularmente a linha de centro da mola.</p>		<p>1) Precisão: tolerância</p> <p>2) Indicar com índice "n" o menor comprimento que pôde ser controlado</p> <p>3) Eliminado quando solicitado em L₀, permitida</p> <p>4) Eliminado quando solicitado em L₁ a L₄, não permitida</p> <p>5) Consulte norma N1008, Tab 4</p>	<p>F1 = 185 kgf</p> <p>F2 = 280 kgf</p> <p>F_{ult} = N</p> <p>F_{ult} theor = 3750 N</p> <p>C = 1,46 N/mm</p> <p>G = 83.000 N/mm²</p> <p>T_{ref} = N/mm²</p> <p>T_{lim} = N/mm²</p> <p>Material: <input checked="" type="radio"/> Arame: 10.5C - DIN 2076-C - DIN17223 FL2 - SAE5160 <input type="radio"/> Barra: _____</p> <p>T_{ref} = <input checked="" type="radio"/> retificado <input type="radio"/> laminado <input type="radio"/> jateado c/ esfereas</p> <p>T_{lim} = <input type="radio"/> retificado <input type="radio"/> jateado c/ esfereas</p> <p>Comprimeto sólido após tratamento superficial</p> <p>L_{0,ref} ± mm</p>
<p>L1 = 335,00 mm</p> <p>L2 = 274,00 mm</p> <p>L_{ext} = mm</p> <p>L_{ax} ≤ mm</p> <p>Material: <input checked="" type="radio"/> Arame: 10.5C - DIN 2076-C - DIN17223 FL2 - SAE5160 <input type="radio"/> Barra: _____</p> <p>T_{ref} = N/mm²</p> <p>T_{lim} = N/mm²</p> <p>Comprimeto sólido após tratamento superficial</p> <p>L_{0,ref} ± mm</p>	<p>F1 = 185 kgf</p> <p>F2 = 280 kgf</p> <p>F_{ult} = N</p> <p>F_{ult} theor = 3750 N</p> <p>C = 1,46 N/mm</p> <p>G = 83.000 N/mm²</p> <p>T_{ref} = N/mm²</p> <p>T_{lim} = N/mm²</p> <p>Material: <input checked="" type="radio"/> Arame: 10.5C - DIN 2076-C - DIN17223 FL2 - SAE5160 <input type="radio"/> Barra: _____</p> <p>T_{ref} = <input checked="" type="radio"/> retificado <input type="radio"/> laminado <input type="radio"/> jateado c/ esfereas</p> <p>T_{lim} = <input type="radio"/> retificado <input type="radio"/> jateado c/ esfereas</p> <p>Comprimeto sólido após tratamento superficial</p> <p>L_{0,ref} ± mm</p>	<p>Compensação na produção</p> <p>Dados de uma força e o respectivo comprimeto comprimido</p> <p>Dados de uma força e o respectivo comprimeto comprimido e o comprimeto livre</p> <p>Dados duas forças e os respectivos comprimetos comprimidos</p>	<p>Através de</p> <p><input checked="" type="radio"/> L₀</p> <p><input type="radio"/> if, d</p> <p><input type="radio"/> if, D</p> <p><input type="radio"/> L₀, if, d</p> <p><input type="radio"/> L₀, if, D</p>
<p>Tolerâncias: <input checked="" type="radio"/> DIN 2095 <input type="radio"/> DIN 2096</p> <p>Grau de qualidade 2</p> <p>Menor precisão que grau 1</p> <p>Menor precisão que grau 3</p> <p>Da, Dm, Di</p> <p>L₀</p> <p>F1 a Fu</p> <p>e1, e2</p>	<p>Menor precisão que grau 1</p> <p>Menor precisão que grau 3</p> <p>Dados de uma força e o respectivo comprimeto comprimido</p> <p>Dados de uma força e o respectivo comprimeto comprimido e o comprimeto livre</p> <p>Dados duas forças e os respectivos comprimetos comprimidos</p>	<p>Dados de uma força e o respectivo comprimeto comprimido</p> <p>Dados de uma força e o respectivo comprimeto comprimido e o comprimeto livre</p> <p>Dados duas forças e os respectivos comprimetos comprimidos</p>	<p>Através de</p> <p><input checked="" type="radio"/> L₀</p> <p><input type="radio"/> if, d</p> <p><input type="radio"/> if, D</p> <p><input type="radio"/> L₀, if, d</p> <p><input type="radio"/> L₀, if, D</p>
<p>Observações Adicionais:</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Característica Crítica</p>			