



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS RUSSAS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**JOÃO PEDRO RODRIGUES DEODATO**

**ROTINA COMPUTACIONAL PARA PROJETO DE MOLA HELICOIDAL DE  
COMPRESSÃO APLICADO A UM PROTÓTIPO VEICULAR DO TIPO BAJA SAE**

**RUSSAS**

**2019**

JOÃO PEDRO RODRIGUES DEODATO

ROTINA COMPUTACIONAL PARA PROJETO DE MOLA HELICOIDAL DE  
COMPRESSÃO APLICADO A UM PROTÓTIPO VEICULAR DO TIPO BAJA SAE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Ms. Ramon Rudá Brito Medeiros

RUSSAS

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- D465r Deodato, João Pedro Rodrigues.  
Rotina Computacional Para Projeto De Mola Helicoidal De Compressão Aplicado A Um Protótipo Veicular Do Tipo Baja Sae / João Pedro Rodrigues Deodato. – 2019.  
75 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2019.  
Orientação: Prof. Me. Ramon Rudá Brito Medeiros.
1. Mola.. 2. Baja. . 3. Dimensionamento. . 4. Rotina. . 5. Computacional.. I. Título.

CDD 620.1

---

JOÃO PEDRO RODRIGUES DEODATO

ROTINA COMPUTACIONAL PARA PROJETO DE MOLA HELICOIDAL DE  
COMPRESSÃO APLICADO A UM PROTÓTIPO VEICULAR DO TIPO BAJA SAE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará Campus de Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Ms. Ramon Rudá Brito Medeiros (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Edvan Cordeiro de Miranda  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro  
Universidade Federal do Ceará – UFC

Ao meu pai, que nunca deixou de me incentivar durante os momentos que se fez presente em minha jornada no ensino superior e que sempre será minha referência de caráter e honestidade. A minha mãe que apesar de todas as adversidades me apoiou e não me deixou pensar em desistir do curso em momento algum.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, irmãos, tias e sobrinhos que nos momentos em que precisei me ausentar para me dedicar aos estudos sempre compreenderam e se prestaram de modo a ajudar.

À minha namorada que esteve me apoiando desde o início dessa jornada no ensino no ensino superior.

Todas as amizades construídas e fortalecidas durante esses cinco anos de graduação.

Ao Professor Ms. Ramon Rudá Brito Medeiros por me orientar em meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, portanto que se dedicaram a mim. Não somente pelo fato de terem me ensinado, mas também por todo apoio moral nos momentos de dificuldade.

Por fim e não menos importante, a minha mãe que nos últimos três anos demonstrou ainda mais força e dedicação por nossa família, desempenhando um papel essencial para a conclusão dessa graduação.

“A educação, qualquer que seja ela, é sempre uma teoria do conhecimento posta em prática.”  
(FREIRE, 2003 p.40).

## RESUMO

O sistema de suspensão automotivo é responsável por garantir mais segurança a veículos de passeio ou para oferecer um melhor desempenho para veículos de competição. Sabendo que a mola é um dos principais componentes do sistema de suspensão automotivo, este trabalho visa a elaboração de uma rotina computacional em ambiente “Scilab” com uma interface gráfica para o dimensionamento de uma mola helicoidal de compressão sujeita a fadiga que possa ser aplicada há uma suspensão de um veículo “off-road” baja SAE. A rotina fornece dados suficientes à fabricação de uma mola helicoidal de compressão e resistente a fadiga, a partir de dados relacionados a carga, a dimensão e a vida útil, fornecidos pelo usuário. Esse conjunto de rotinas é desenvolvido com base em teorias de elementos de máquina, de maneira a possibilitar uma maior compreensão e otimização do referido sistema, fornecendo as informações necessárias para uma melhor análise de custo benefício na escolha do material utilizado e para o início da viabilização física da mola.

**Palavras-chave:** Mola. Baja. Dimensionamento. Rotina. Computacional.

## ABSTRACT

The automotive suspension system is responsible for ensuring more safety for passenger cars or offer better performance for racing vehicles. Knowing that the spring is one of the main components of the automotive suspension system, this work aims to create a computational routine in the Scilab environment, in conjunction with a graphical interface for the design of a fatigue resistant compression helical suspension spring that can be applied to a suspension off road baja SAE vehicle. The routine provides enough data for the manufacturing of a fatigue resistant compression helical suspension spring, from data related to load, size and working life, provided by the user. This set of routines is developed based on machine element theories, in order to allow a better perception and optimization of the referred system, providing the necessary information for a better cost benefit analysis in the choice of the material used and the beginning of the spring physical viability.

**Keywords:** Spring. Baja. design. Routine. Computational.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Molas helicoidais.....	17
Figura 2 – Molas em lâminas.....	18
Figura 3 – Tipos de mola Helicoidais .....	19
Figura 4 – Suspensão dianteira de um baja.....	19
Figura 5 – Resistências mínimas sob tração de fios de mola – identificados pelo número ASTM.....	22
Figura 6 – Parâmetros dimensionais para molas helicoidais de compressão.....	24
Figura 7 – Tipos de extremidades para molas helicoidais de compressão.....	25
Figura 8 – Curva força-deflexão de uma mola helicoidal de compressão padrão.....	27
Figura 9 – Distribuições de tensões através do fio em uma mola helicoidal de compressão.....	28
Figura 10 – Curvas de condições críticas de flambagem .....	31
Figura 11 – Diagrama de Goodman modificado de tensão torcional para fio redondo .....	34
Figura 12 – Diagrama de Goodman modificado mostrando a linha de carga e dados neces- sários para cálculo do coeficiente de segurança de uma mola de compressão carregada dinamicamente. ....	36
Figura 13 – Execução da rotina para a validação dos resultados.....	43
Figura 14 – Execução da rotina para a validação dos resultados.....	44
Figura 15 – Montagem do sistema de suspensão dianteiro.....	46
Figura 16 – Interface gráfica do programa .....	47
Figura 17 – Dados obtidos no estudo de caso .....	48
Figura 18 – Gráfico C- Nsf do estudo de caso .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetros preferenciais de fio.....	21
Tabela 2 – Coeficientes e expoentes para a Equação .....	23
Tabela 3 – Formulas para as características das molas helicoidais de compressão. ....	26
Tabela 4 – Resistência de escoamento torcional máxima $S_{y,s}$ para molas helicoidais de compressão em aplicações estáticas. ....	32
Tabela 5 – Resistência de fadiga torcional máxima $S_{f,w}$ para molas helicoidais de compressão de fio redondo em aplicações cíclicas (razão de tensão, $R=0$ ).....	32
Tabela 6 – Dados para a validação de resultados.....	42
Tabela 7 – Resultados do Exemplo x Resultados obtidos.....	43
Tabela 8 – Dados para a 2 <sup>a</sup> validação de resultados .....	44
Tabela 9 – Resultados do Exemplo x Resultados obtidos.....	44
Tabela 10 – Dados para o estudo de caso .....	46
Tabela 11 – Dados obtidos para o ASTM A227 .....	49
Tabela 12 – Dados obtidos para o ASTM A229 .....	49
Tabela 13 – Dados obtidos para o ASTM A232 .....	49
Tabela 14 – Dados obtidos para o ASTM A401 .....	49

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C$	Índice de mola
$d$	Diâmetro de fio
$D$	Diâmetro médio de espira
$D_i$	Diâmetro interno
$D_o$	Diâmetro externo
$E$	Módulo de elasticidade
$F$	Força ou carga
$F_a$	Carga alternante
$F_m$	Carga média
$F_i$	Carga inicial
$F_{max}$	Máxima carga variada
$F_{min}$	Mínima carga variada
$f_n$	Frequência natural
$g$	Aceleração gravitacional
$G$	Módulo de cisalhamento, módulo de rigidez
$k$	Razão ou constante de mola
$K_c$	Fator de curvatura
$K_s$	Fator de cisalhamento direto
$K_w$	Fator de Wahl – torção
$L_f$	Comprimento livre – mola de compressão
$L_s$	comprimento fechado – mola de compressão
$N$	Número de espiras
$N_a$	Número de espiras ativas
$N_{fs}$	coeficiente de segurança à fadiga – torção
$N_{fechada}$	coeficiente de segurança – altura fechada (escoamento)
$N_t$	Número total de espiras

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>16</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral .....</i>	<i>16</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivo específicos .....</i>	<i>16</i>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Utilização e Características das molas.....</b>	<b>17</b>
<i>2.1.1</i>	<i>Amortecedores.....</i>	<i>19</i>
<b>2.2</b>	<b>Materiais das Molas.....</b>	<b>20</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Arame.....</i>	<i>21</i>
<b>2.3</b>	<b>Molas helicoidais de compressão.....</b>	<b>23</b>
<i>2.3.1</i>	<i>Comprimentos de molas.....</i>	<i>24</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Detalhes de extremidade.....</i>	<i>25</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Índice de mola.....</i>	<i>25</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Deflexão de mola.....</i>	<i>26</i>
<i>2.3.5</i>	<i>Constante de mola.....</i>	<i>27</i>
<i>2.3.6</i>	<i>Tensões em espiras de molas helicoidais de compressão.....</i>	<i>28</i>
<i>2.3.7</i>	<i>Tensões residuais.....</i>	<i>29</i>
<i>2.3.8</i>	<i>Flambagem de molas de compressão.....</i>	<i>30</i>
<i>2.3.9</i>	<i>Resistências permissíveis de molas de compressão.....</i>	<i>31</i>
<b>2.4</b>	<b>O diagrama de Goodman modificado para fio de mola.....</b>	<b>33</b>
<b>2.5</b>	<b>Dimensionamento de molas helicoidais de compressão à fadiga.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6</b>	<b>O ambiente Scilab.....</b>	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1</b>	<b>O ambiente Matlab.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2</b>	<b>Dados de entrada do programa.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3</b>	<b>Cálculos iniciais.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4</b>	<b>Cálculo das tensões e das dimensões admissíveis.....</b>	<b>40</b>
<b>3.5</b>	<b>Cálculo das propriedades e coeficiente de segurança para cada material.....</b>	<b>41</b>
<b>3.6</b>	<b>Análise de flambagem.....</b>	<b>42</b>
<b>3.7</b>	<b>Estudo de caso.....</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b>Estudo de caso.....</b>	<b>48</b>

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>Trabalhos Futuros.....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>
	<b>APÊNDICE A – Rotina Computacional para o dimensionamento de molas helicoidais sujeitas à fadiga.....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A SAE – Society of Automobile Engineers inicia no Brasil em 1994 a primeira competição de baja, que desde então vem desafiando os alunos de engenharia a aplicarem os conceitos aprendidos para a fabricação de um miniveículo do tipo off-road passando pelas etapas de concepção, projeto detalhado, construção e testes, formando equipes que representem a Instituição de Ensino Superior.

O desempenho do carro vai muito além da velocidade e potência. A suspensão tem como objetivo absorver as vibrações e choques das rodas, proporcionando além da estabilidade uma melhor comodidade ao motorista. A suspensão é responsável ainda, por garantir com que as rodas do veículo se mantenham em contato com o solo, sobretudo nas curvas. Logo, a suspensão é o que conecta as rodas e pneus ao corpo do veículo, permitindo movimento relativo (JAZAR, 2008).

A suspensão é um item fundamental para dar estabilidade ao veículo nas freadas, curvas e em situações em que o carro precise de estabilidade e controle da direção. O principal componente de uma suspensão é a mola. Sem as molas e amortecedores o desconforto seria muito grande, além de comprometer a vida útil do veículo que diminuiria muito com os impactos transferidos para o mesmo.

A diferença de carga nas rodas de um mesmo eixo pode ser modificada independente da distribuição de carga propiciada pela posição do centro de gravidade. Utilizam-se para isso eixos dianteiro e traseiro com diferentes tipos de suspensão e rigidez de molas. Essa rigidez pode ser modificada pela escolha de molas propriamente ditas e pelo uso de estabilizadores (NICOLAZZI; ROSA, 2001).

Dentre os elementos de máquinas estudados na graduação em Engenharia Mecânica está a mola, elemento que tem como principal função o armazenar de energia mecânica. Como a maioria dos problemas relacionados a projeto sobre elementos de máquinas requerem iterações, o que demanda muito tempo e energia, a utilização de rotinas computacionais para obtenção de resultados mais rápidos e precisos se torna assim, uma excelente opção nesses casos.

Na construção de máquinas as molas helicoidais de arame e aço são amplamente empregadas. Em geral, as mesmas são de baixo preço, fácil dimensionamento e montagem, podendo ainda ser aplicadas tanto para forças de tração como de compressão.

## 1.1 Objetivos

### *1.1.1 Objetivo geral*

O trabalho propõe a elaboração de uma rotina computacional em ambiente Scilab com uma interface gráfica para o dimensionamento de uma mola helicoidal de compressão sujeita à fadiga que possa ser aplicada há uma suspensão de um veículo off-road baja SAE.

### *1.1.2 Objetivos específicos*

- Dimensionar uma mola helicoidal de compressão sobre fadiga;
- Promover a utilização de rotinas computacionais na resolução de problemas na engenharia;
- Desenvolver uma ferramenta, ágil e de fácil utilização, que auxilie na análise de dimensionamento de molas helicoidais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica buscará revisar as diversas abordagens presentes na literatura no que se refere ao cálculo estrutural de molas helicoidais e definições relacionadas a suspensão automotiva. Assim, pretendemos identificar as necessidades específicas do projeto de suspensão automotiva e elaboração das rotinas computacionais.

### 2.1 Utilização e Características das molas

Segundo Collins (2006), as molas podem ser definidas de uma forma geral como estruturas ou dispositivos que exibem deformação elástica quando carregados e que recuperam a sua configuração inicial quando a carga é removida. As molas são projetadas para prover uma força de tração, compressão ou um torque, ou com funcionalidade de guardar energia. Molas podem apresentar formatos de barra plana ou espiras, sendo constituídas de fios redondos ou retangulares dobrados, no caso das espiras.

Molas de fio aparecem na forma de molas helicoidais de compressão (Figura 1), helicoidais de tração, helicoidais de torção e formas encomendadas. Molas planas são geralmente do tipo em balanço ou vigas bi-apoiadas e podem ter diferentes formas (NORTON, 2013).

Figura 1 – Molas helicoidais



Fonte:  
<<http://www.rcmolas.com.br/mola-helicoidal-compressao>> (2019).

A suspensão que dependente de feixe de molas (Figura 2) é pouca utilizada em veículos de passeio por conta da falta de conforto. Assim, seu uso é direcionado para veículos pesados. No entanto a suspensão que dependente de molas helicoidais proporcionam mais conforto, são mais leves e ocupam um menor espaço (GILLESPIE, 1992).

Figura 2 – Molas em lâminas



Fonte:

<https://www.rassini-nhk.com.br/produtos-nhk-feixes-de-mola/> (2019).

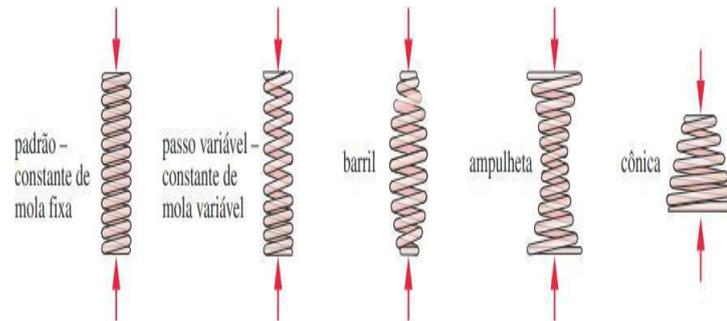
A função primária da suspensão de um veículo é a de isolar da melhor maneira possível a massa suspensa das perturbações provenientes da superfície irregular da estrada. Para fazer isso as rodas e as massas integrantes, as chamadas massas não suspensas, são ligadas a uma carroceria com ligações mecânicas, que permitem o seu movimento relativo, principalmente na direção vertical. Estas forças são transmitidas para os amortecedores e elementos da suspensão (GENTA; MORELLO, 2009).

As molas flexíveis, atualmente utilizadas, exigem batentes de borracha na compressão e na tração como limitadores de curso. Esses batentes ocasionam um aumento da rigidez da mola no final o seu curso de compressão ou de distensão (NICOLAZZI; ROSA, 2001).

As molas helicoidais são provavelmente as mais utilizadas. A Figura 3 ilustra alguns tipos de molas helicoidais. A fabricação de uma mola é feita enrolando-se um arame na forma helicoidal, desta forma a mola helicoidal possui histerese desprezível. Logo, o amortecimento é realizado pelo amortecedor (FREITAS, 2006).

As molas helicoidais de compressão, como o próprio nome já diz, fornecem uma força de compressão, sendo capazes de grandes deflexões. Segundo Collins (2006) seu formato padrão apresenta diâmetro de espira constante, passo constante e constante de mola fixa. Em sua maioria constituída de fio de seção transversal circular, mas também podem ser feitas de seção retangular. Para obter-se uma constante variável o passo pode ser variado.

Figura 3 – Tipos de mola Helicoidais



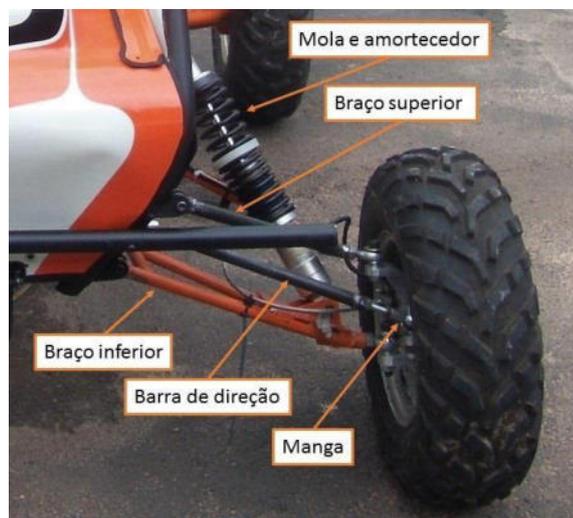
Fonte: NORTON (2013)

### 2.1.1 Amortecedores

A principal função do amortecedor é reduzir e limitar as oscilações provocadas pela mola da suspensão. Além disso, mantém o contato dos pneus com o solo melhorando a estabilidade do veículo. A energia transmitida às molas, devido aos impactos provocados pela irregularidade do solo, é absorvida pelo amortecedor e dissipada em forma de calor para o ambiente. Sem a utilização desse dispositivo a mola oscilaria indefinidamente.

Esta característica é desconfortável para o ocupante e prejudicial na resposta dinâmica do veículo, comprometendo assim a estabilidade e durabilidade dos sistemas veiculares (SOUSA, 2017). A Figura 4 um amortecedor montado no sistema de suspensão de um baja SAE.

Figura 4 – Suspensão dianteira de um baja



Fonte: BARBOSA (2016)

Amortecedores são elementos que em um movimento qualquer geram uma força contrária ao sentido do movimento, isso causa uma desaceleração do sistema e diminui o tempo com que o sistema atinge o seu equilíbrio, ou seja, os amortecedores permitem que um movimento dure menos tempo do que se ele não estivesse atuando (IEZZO, 2010).

Constata-se que no histórico do desenvolvimento dos tipos de suspensão inicialmente as inovações tecnológicas foram empregadas em competições automobilísticas e então passaram a ser utilizadas na produção em série (BARBOSA, 2016).

## **2.2 Materiais das Molas**

Materiais utilizados para a fabricação de molas devem ter alta resistência, alta resiliência, um ponto de escoamento alto, resistência à fluência e um baixo módulo de elasticidade, para que possa proporcionar o máximo de armazenamento de energia.

No caso de molas carregadas dinamicamente a resistência a fadiga se torna uma propriedade indispensável. Vários materiais satisfazem os critérios mencionados anteriormente, dentre esses materiais pode-se citar o aço carbono, o aço-liga, o aço inox, bem como materiais não ferrosos como o bronze-fósforo, latão de mola, cobre berílio e varias ligas de níquel (COLLINS, 2006).

Segundo Norton (2013), maior parte das molas de uso não intenso são produzida com fio circular ou retangular feito de aço repuxado, trabalhado a frio ou a partir de tiras planas, finas e laminadas a frio. Molas para uso intenso, como as que compõem a suspensão de veículos, são normalmente construídas de formas laminadas a quente ou forjadas.

O uso de fio quadrado ou retangular não é recomendado para molas, a menos que limitações de espaço o façam necessário. Molas de formatos especiais de fio não são feitas em grandes quantidades. Ao contrário daquelas de fio redondo, elas não tiveram benefício de desenvolvimento refinado, portanto podem não ser tão fortes quanto as molas feitas de fio redondo. (BUDYNAS; NISBETT, 2011p.527).

Após o material do arame ou da tira ser enrolado ou conformado, uma operação de jateamento por granalha, martelamento ou pré-tensionamento é algumas vezes utilizada para melhorar a resistência à fadiga (COLLINS, 2006).

### 2.2.1 Arame

O material mais utilizado para a fabricação de molas é o arame de seção circular, podendo ser encontrado em uma grande quantidade de materiais e tamanhos. Os diâmetros comerciais padrões estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Diâmetros preferenciais de fio

<b>Diâmetros preferenciais de fio</b>			
<b>US (in)</b>	<b>SI (mm)</b>	<b>US (in)</b>	<b>SI (mm)</b>
0,004	0,10	0,081	2,00
0,005	0,12	0,085	2,20
0,006	0,16	0,092	
0,008	0,20	0,098	2,50
0,010	0,25	0,105	
0,012	0,30	0,112	2,80
0,014	0,35	0,125	
0,016	0,40	0,135	3,50
0,018	0,45	0,148	
0,020	0,50	0,162	4,00
0,022	0,55	0,177	4,50
0,024	0,60	0,192	5,00
0,026	0,65	0,207	5,50
0,028	0,70	0,225	6,00
0,030	0,80	0,250	6,50
0,035	0,90	0,281	7,00
0,038	1,00	0,312	8,00
0,042	1,10	0,343	9,00
0,045		0,362	
0,048	1,20	0,375	
0,051		0,406	10,00
0,055	1,40	0,437	11,00
0,059		0,469	12,00
0,063	1,60	0,500	13,00
0,067		0,531	14,00
0,072	1,80	0,562	15,00
0,076		0,625	16,00

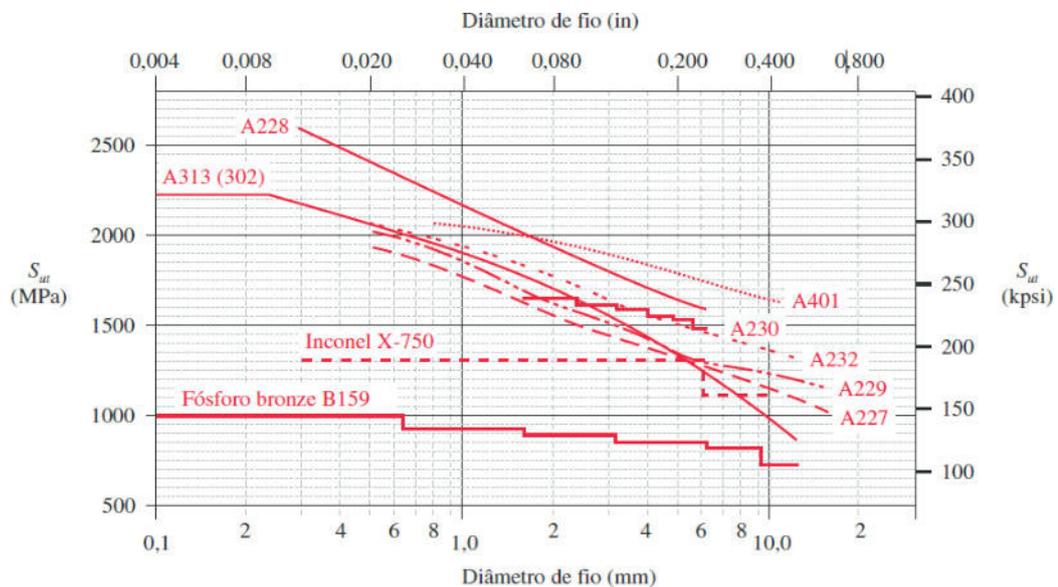
Fonte: NORTON (2013)

Assim, os materiais utilizados na fabricação de molas podem ser comparados através de uma análise de suas resistências à tração, estas variam tanto com o tamanho do fio como o material e seu processamento. De acordo com Collins (2006), os materiais de mola que são amplamente utilizados na indústria de molas incluem:

1. Corda de piano (maior qualidade, maior resistência e amplamente utilizado);
2. Arame para mola de válvula de aço revenido em óleo (alta qualidade, alta resistência e dimensões limitadas);
3. Arame de mola de aço revenido em óleo (boa qualidade, boa resistência e são frequentemente utilizados);
4. Arame de aço encruado (barato, resistência modesta e são utilizado para cargas estáticas);
5. Arame de aço liga (para temperaturas elevadas até 230°C, alta qualidade, alta Resistência, p.ex., cromo-vanádio e cromo-silício);
6. Arame de aço inox (boa resistência à corrosão para temperaturas elevadas até 260oC, alta qualidade e alta resistência);
7. Arame de cobre-berílio (boa condutividade, alta resistência e excelente resistência à fadiga);
8. Arame de liga de níquel (boa resistência a corrosão para temperaturas elevadas até 600°C, p.ex., Inconel X-750 e custo elevado).

A relação entre o tamanho do arame e a resistência à tração mostrada na Figura 5:

Figura 5 – Resistências mínimas sob tração de fios de mola – identificados pelo número ASTM



Fonte: NORTON ( 2013)

Com dados dos materiais mostrados na Figura 5 pode ser aproximado o limite de resistência à tração pela expressão empírica,

$$S_{ut} \cong Bd^a \quad (1)$$

Onde  $A$  e  $b$  são definidos pela Tabela 2 que contém os parâmetros para diversos tipos

de materiais de arame. Sendo o valor de  $d$  expresso em milímetros.

Tabela 2 – Coeficientes e expoentes para a Equação

N° ASTM	Material	Intervalo		Expoente b	Coeficiente A		Fator de correlação
		mm	in		MPa	psi	
A227	Repuxado a frio	0,5-16	0,020-0,625	-0,182 2	1753,3	141040	0,998
A228	Fio musical	0,3-6	0,010-0,250	-0,162 5	2153,5	184649	0,9997
A229	Revenido em óleo	0,5-16	0,020-0,625	-0,183 3	1831,2	146780	0,999
A232	Cromo-v	0,5-12	0,020-0,500	-0,145 3	1909,9	173128	0,998
A401	Cromo-s	0,8-11	0,031-0,437	-0,093 4	2059,2	220779	0,991

Fonte: NORTON (2013)

Segundo Norton (2013) testes bastante abrangentes mostrou que a estimativa razoável do limite de resistência à torção de materiais usados comumente em molas é de 67% do limite de resistência do material.

$$S_{us} \cong 0,67S_{ut} \quad (2)$$

### 2.3 Molas helicoidais de compressão

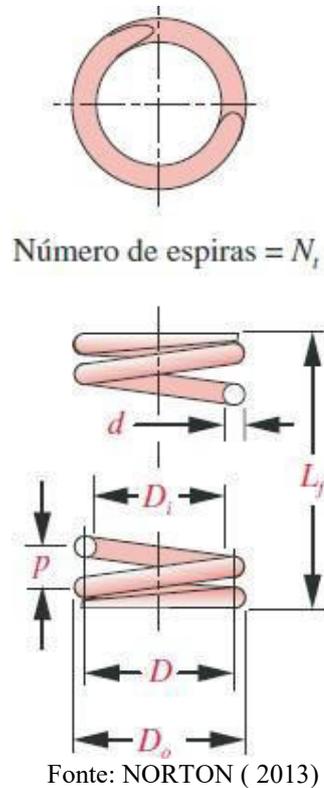
Como descrito anteriormente a mola helicoidal de compressão mais comum é de diâmetro de espira constante, passo constante e seção de fio circular. Molas helicoidais podem apresentar espiras de mão esquerda ou direita (NORTON, 2013).

Dentre os parâmetros utilizados para os cálculos de projeto e fabricação desse tipo de mola estão:

1. Diâmetro do fio  $d$ ;
2. Diâmetro médio da espira  $D$ ;
3. Comprimento livre  $L_f$ ;
4. Número de espiras  $N_t$ ;
5. Passo de espiras  $p$ .

O diâmetro externo  $D_o$  e o diâmetro interno  $D_i$  são essenciais para definir o tamanho do alojamento e a forma como a mola será alocada, seja em um furo ou pino.

Figura 6 – Parâmetros dimensionais para molas helicoidais de compressão



De acordo com Melconian (2019) recomenda-se que ângulo de inclinação da espira  $\lambda$  não deve ser maior que  $12^\circ$ . Dado pela equação,

$$\lambda = \arctg \frac{P}{\pi D} \quad (3)$$

### 2.3.1 Comprimentos de molas

O comprimento livre  $L_f$ , é o comprimento total da mola quando não está carregada. O comprimento montado  $L_m$ , é o comprimento da mola após ser montada, apresentando assim a deflexão inicial,  $y_{inicial}$ .

A deflexão inicial e constante de mola determina a quantidade de força necessária para a montagem da mola. A carga de trabalho é aplicada para comprimir adicionalmente a mola até a sua deflexão de trabalho,  $y_{trabalho}$ .

O comprimento mínimo de trabalho  $L_m$ , é a menor dimensão que a mola pode

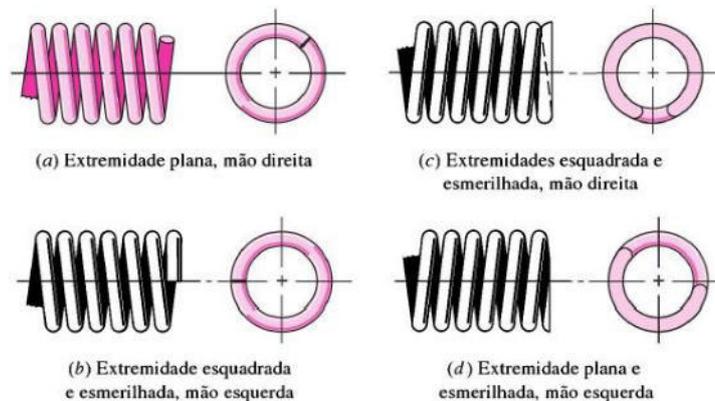
atingir quando estiver em serviço. O comprimento fechado  $L_s$ , é o seu comprimento quando a mesma for comprimida até que todas as suas espiras se toquem. O limite de interferência  $y_{interf}$  é a diferença entre o comprimento mínimo de trabalho e a altura fechada, expresso como uma porcentagem da deflexão de trabalho.

A fim de evitar que a mola atinja a altura de fechamento em serviço é recomendado um valor mínimo de interferência de 10-15% (NORTON, 2013).

### 2.3.2 Detalhes de extremidade

Existem quatro tipos de detalhes de extremidade para molas helicoidais de compressão: extremidade simples, extremidade simples esmerilhada, extremidade esquadrejada e extremidade em esquadro esmerilhada, como ilustrado na Figura 7:

Figura 7 – Tipos de extremidades para molas helicoidais de compressão



Fonte: BUDYNAS; NISBETT (2011)

Extremidades simples resultam do corte simples das espiras, deixando as extremidades com o mesmo passo que o resto da mola. Essa é a forma mais barata de terminação, porém fornece um alinhamento pobre com relação à superfície contra a qual a mola é pressionada. As extremidades podem ser esmerilhadas para ficarem planas e perpendiculares ao eixo da mola, assim produzirem uma superfície normal para aplicação de carga.

Esquadrear as extremidades envolve levar as espiras de extremidade ao escoamento para torná-las planas e remover os seus passos. Isso melhora o alinhamento. Uma superfície plana na espira de extremidade de pelo menos  $270^\circ$  é recomendada para operação

adequada.

Esquadrear e esmerilhar combinadamente produz uma superfície plana de 270°-330° para aplicação de carga. Esse é o tratamento mais custoso de extremidade, contudo é recomendado para molas de máquinas, a menos que o diâmetro do fio seja muito pequeno (menor que 0,02 in ou 0,5 mm), caso em que elas devem ser esquadreadas, porém sem esmerilhamento (NORTON, 2013).

A quantidade de espiras e o comprimento da mola são afetados pela forma de sua extremidade, a Tabela abaixo mostra como esse fator, afeta essas características.

Tabela 3 – Formulas para as características das molas helicoidais de compressão

Termo	Tipo de extremidades de mola			
	Plana	Plana e esmerilhada	Esquadrada ou fechada	Esquadrada e esmerilhada
Espirais de extremidade, $N_e$	0	1	2	2
Total de espirais, $N_t$	$N_o$	$N_o + 1$	$N_o + 2$	$N_o + 2$
Comprimento livre, $l_0$	$pN_o + d$	$p(N_o + 1)$	$pN_o + 3d$	$pN_o + 2d$
Comprimento sólido, $L_s$	$d(N_t + 1)$	$dN_t$	$d(N_t + 1)$	$dN_t$
Passo, $p$	$(l_0 - d)/N_o$	$l_0/(N_o + 1)$	$(l_0 - 3d)/N_o$	$(l_0 - 2d)/N_o$

Fonte: BUDYNAS; NISBETT (2011)

### 2.3.3 Índice de mola

O índice de mola  $C$  é a razão entre o diâmetro de espira  $D$  e o diâmetro de fio  $d$ .

Equação 4.

$$C = \frac{D}{d} \quad (4)$$

O índice de mola deve assumir preferivelmente valores no intervalo entre 4 e 12, pois quando  $C < 4$  a fabricação da mola torna-se difícil e quando  $C > 12$  a mola tende a flambar em compressão. (NORTON, 2013)

### 2.3.4 Deflexão de mola

De acordo com Norton (2013), uma mola helicoidal de compressão é, de fato, uma barra de torção enrolada em uma forma de hélice, que a empacota melhor. A deflexão de uma mola helicoidal de compressão com fio redondo pode ser obtida pela Equação 5.

$$y = \frac{8FD^3N_a}{d^4G} \quad (5)$$

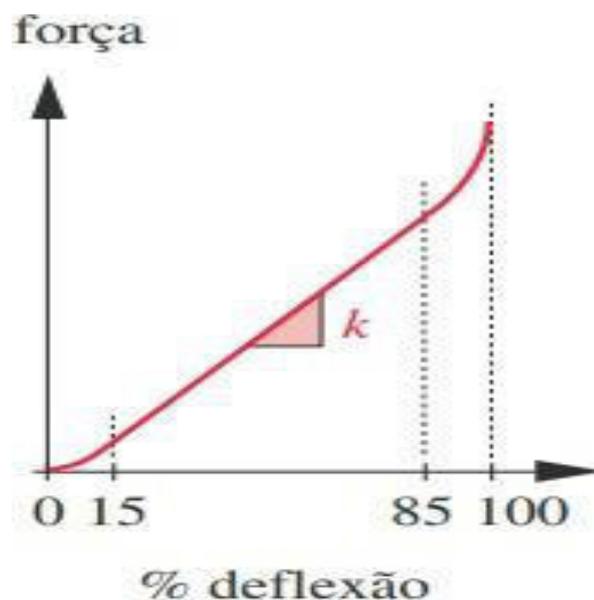
### 2.3.5 Constante de mola

A partir da equação de deflexão podemos encontrar a Equação 6 para cálculo da constante de mola.

$$k = \frac{F}{y} = \frac{d^4G}{8D^3N_a} \quad (6)$$

A constante de mola  $k$  de uma mola helicoidal de compressão padrão de espira constante é basicamente linear durante o seu intervalo de operação e no fim de sua deflexão têm em um intervalo muito pequeno uma constante não linear, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Curva força-deflexão de uma mola helicoidal de compressão padrão.



Fonte: NORTON ( 2013)

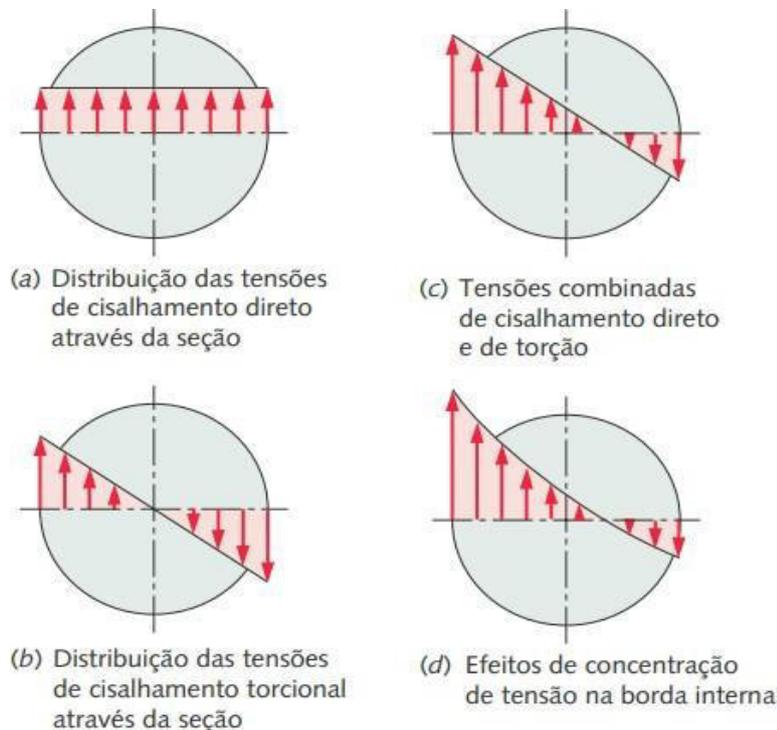
Quando a mola atinge o seu comprimento fechado  $L_s$  todas as espiras estão em contato e a constante de mola se torna a rigidez das espiras sólidas em compressão (NORTON, 2013).

É recomendado que a constante de mola seja definida no intervalo entre 15% e 85% de sua deflexão total e seu intervalo de deflexão de trabalho deve ser mantido dentro dessa região.

### 2.3.6 Tensões em espiras de molas helicoidais de compressão

A Figura 9 mostra o diagrama de corpo-livre para a seção transversal de uma espira. Nota-se uma tensão de cisalhamento por torção devida ao torque ( $T$ ) e uma tensão de cisalhamento devido à força cortante ( $F$ ) distribuídas conforme indicado na mesma figura. A fibra interior da seção transversal do fio é o ponto que apresenta a máxima tensão de cisalhamento, pois é onde as duas tensões se somam diretamente.

Figura 9 – Distribuições de tensões através do fio em uma mola helicoidal de compressão.



Fonte: NORTON (2013)

A partir dessas informações, colocando o termo de cisalhamento direto na forma

de um fator de cisalhamento direto  $K_s$ , temos que a tensão máxima de cisalhamento  $\tau_{max}$  se dá pela Equação 7 e 8:

$$\tau_{max} = K_s \frac{8FD}{\pi d} \quad (7)$$

Onde,

$$K_s = \left(1 + \frac{0,5}{C}\right) \quad (8)$$

Sabendo que vigas curvas têm concentração de tensão na superfície interna de curvatura, devemos utilizar esse mesmo raciocínio para a mola, mesmo que ela não seja carregada como uma viga, pois as tensões maiores se dão na superfície interna da espira.

De acordo com Wahl (1963, apud NORTON, 2013) o fator de concentração de tensões para fio redondo, fator  $K_w$ , inclui tanto o efeito das tensões diretas de cisalhamento quanto a concentração de tensões devido à curvatura, o que é válido para um fio redondo com  $C > 1,2$ .

$$K_w = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0,615}{C} \quad (9)$$

$$\tau_s = K_w \frac{8FD}{\pi d} \quad (10)$$

Uma vez que o fator de Wahl inclui ambos os efeitos, podemos separá-los em um fator de curvatura  $K_c$  e em um fator de tensão de cisalhamento direta  $K_s$  usando,

$$K_c = \frac{K_w}{K_s} \quad (11)$$

### 2.3.7 Tensões residuais

De acordo com a abordagem anterior, tensões residuais de tração ocorrem na superfície interior e tensões residuais de compressão se desenvolvem na superfície

externa quando o fio é conformado em uma hélice. Nenhuma dessas tensões trazem quaisquer benefícios. Assim as mesmas podem ser removidas através de tratamentos de remoção de tensões. Segue alguns desses tratamentos segundo Norton (2013):

1. Ajuste: Esse processo consiste em comprimir a mola à sua altura fechada e produzir escoamento do material para introduzir tensões residuais benéficas. O ajuste de mola pode aumentar a sua capacidade de carga estática em 45-65% e duplicar a capacidade de armazenamento de energia por peso de material.
2. Carga reversa: Ajustadas ou não, as espiras de mola terão algum tipo de tensão residual presente. Por isso, não é aceitável que se apliquem tensões reversas a elas. Se assumirmos que as tensões residuais tenham sido arranjadas para atuar de maneira benéfica contra a direção esperada de carregamento, então tensões reversas irão obviamente exacerbar as tensões residuais e causar falha prematura. Uma mola de compressão nunca deve ser carregada em tração, nem uma mola de tração em compressão.
3. Jateamento por esferas: Esta é outra forma de obter tensões residuais benéficas em molas, sendo mais efetiva para carregamentos cíclicos em fadiga. É de pouco benefício para molas sob cargas estáticas. Além disso, se o passo de espira é pequeno, o jateamento não pode efetivamente impactar as superfícies mais internas das espiras.

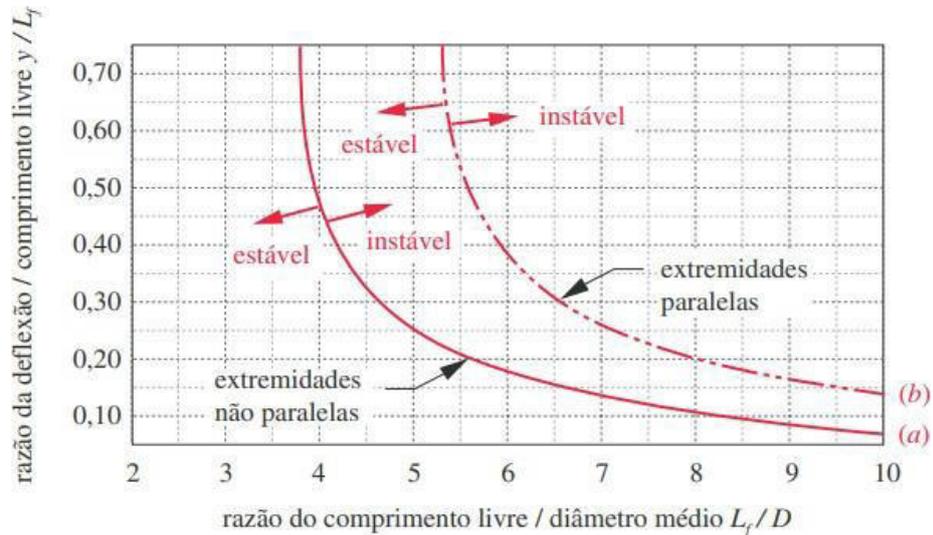
### **2.3.8 Flambagem de molas de compressão**

Um fator importante no que se trata do projeto de molas é a instabilidade elástica ou flambagem de longas e finas molas helicoidais sobre compressão. Do mesmo modo que colunas finas e longas, quando submetidas à compressão axial elevada, tendem a flambar.

Assim, as molas helicoidais de compressão também irão flambar caso a deflexão axial for muito elevada. Um fator de esbeltez similar considerando a razão entre o comprimento livre e o diâmetro da espira  $L_f / D$  pode ser criado neste caso. Se esse fator for menor que 4, a mola pode flambar.

Juntamente com esse fator a razão entre a deflexão da mola, seu comprimento livre e as condições de extremidade da mola afetam diretamente sua estabilidade. A relação entre essas condições está expressa na forma um gráfico na figura.

Figura 10 – Curvas de condições críticas de flambagem



Fonte: NORTON (2013)

Uma solução alternativa para a flambagem, que algumas vezes é utilizada, é colocar a mola dentro de um cilindro guia com pouca folga ou inserir um mandril guia cilíndrico interno para evitar flambagem, mas o atrito e o desgaste podem produzir falhas de outro tipo caso essa solução for escolhida (COLLINS, 2006, p.462).

### 2.3.9 Resistências permissíveis de molas de compressão

Tanto para cargas estáticas quanto dinâmicas existe uma grande quantidade de dados de testes referentes à resistência de falha de molas helicoidais de compressão feitas de fio redondo.

Para estimar a resistência ao escoamento sob torção de molas helicoidais a compressão em condições estáticas de carregamento deve se utilizar a Tabela 4, que mostra fatores de resistência ao escoamento o recomendados para diversos materiais de fios de mola relacionados com uma porcentagem do limite de resistência à tração.

Tabela 4 – Resistência de escoamento torcional máxima  $S_{ys}$  para molas helicoidais de compressão em aplicações estáticas.

Tensões de flexão ou flambagem não incluídas. Fonte: Referência 1

Material	Percentagem máxima do limite da resistência de tração	
	Antes da remoção de deformação permanente:	Depois da remoção de deformação permanente:
	Ajuste (use Equação 14.9b)	Ajuste (use Equação 14.8b)
Aço-carbono repuxado a frio (por exemplo, A227, A228)	45%	60-70%
Aço-carbono endurecido e revenido e aço de baixa liga (por exemplo, A229, A230, A232, A401)	50	65-75
Aço inoxidável austenítico (por exemplo, A313)	35	55-65
Ligas não ferrosas (por exemplo, B134, B159, B197)	35	55-65

Fonte: NORTON (2013)

A resistência à fadiga,  $S_{fw}$ , no intervalo  $10^3 < N < 10^7$  ciclos, sofre uma variação de acordo o material e com o fato de ter sofrido jateamento de esferas ou não, a Tabela 5 destaca valores recomendados para diferentes materiais de fio para as condições com e sem jateamento para três pontos nos respectivos diagramas  $S-N$ .

Tabela 5 – Resistência de fadiga torcional máxima  $S_{fw}$  para molas helicoidais de compressão de fio redondo em aplicações cíclicas (razão de tensão,  $R = 0$ ).

Vida a fadiga (ciclos)	Percentual do limite de resistência à tração			
	ASTM 228, aço inox austenítico deformação permanente:		ASTM A230 e A232 e não ferrosos deformação permanente:	
	sem jateamento	com jateamento	sem jateamento	com jateamento
$10^5$	36%	42%	42%	49%
$10^6$	33	39	40	47
$10^7$	30	36	38	46

Fonte: NORTON (2013)

Segundo Zimmerli (1957, apud NORTON, 2013), todos os fios de aços de mola de menos de 10 mm de diâmetro apresentam um limite de resistência à fadiga torcional para vida infinita,  $S_{ew}$ , com razão de tensão  $R = 0$ ,

$$S_{ewJ} \cong 310 \text{Mpa} \quad (12)$$

para molas não jateadas e,

$$S_{ewj} \cong 465 \text{Mpa} \quad (13)$$

para molas jateadas.

Como os dados de teste foram obtidos sob condições reais não há necessidade, neste caso, de aplicar correções para a condição de superfície, tamanho ou fatores de correção de carga para  $S_{fw}$  ou  $S_{ew}$ .

## 2.4 O diagrama de Goodman modificado para fio de mola

Dada qualquer situação de carregamento de mola pode-se construir um diagrama de Goodman modificado. No intuito de simplificar o projeto à fadiga é essencial a determinação das tensões efetivas de Von Mises para casos de carregamento combinado.

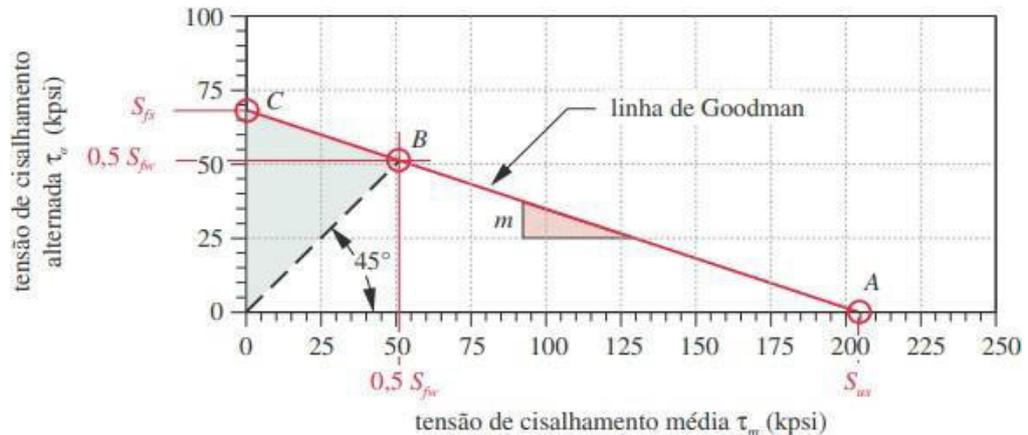
Uma situação de carregamento torcional puro pode ser resolvida convertendo as tensões de cisalhamento a tensões equivalentes de Von Mises e comparando-as às resistências do material sobre tração. Porém, no caso de dimensionamento de molas helicoidais de compressão, faz pouco sentido utilizar o procedimento de Von Mises, porque as resistências à fadiga empiricamente desenvolvida para fios, são expressas em termos de resistências torcionais. Portanto, será mais fácil construir um diagrama de Goodman utilizando a resistência à torção e aplicando as tensões torcionais calculadas diretamente a esse diagrama (NORTON, 2013, p.806).

Seguindo o procedimento demonstrado por Norton (2009) pode-se enumerar os seguintes passos à criação do diagrama de Goodman modificado:

1. O limite de resistência à tração do material é convertido ao limite de resistência torcional pela Equação 2.2, a partir de dados da Tabela 2. Permitindo determinar um ponto na linha de Goodman. Esse valor é plotado como ponto A no diagrama da Figura 11.
2. O ponto  $S_{fw}$  ou  $S_{ew}$ , dependendo de se tratar de vida finita ou infinita na linha de Goodman modificada para uma combinação de material/tamanho em carregamento puramente torcional, pode ser calculado a partir dos dados na Tabela 5 ou da Equação 2.12 respectivamente.
3. A resistência à fadiga do fio  $S_{fw}$  ou o limite de resistência à fadiga  $S_{ew}$  é plotada em uma linha  $45^\circ$  da origem de modo a corresponder às condições de ensaio de componentes de tensões média e alternada iguais (razão de tensão  $R = \tau_{min}/\tau_{max} = 0$ ). O ponto B é então conectado com o limite de resistência ao cisalhamento  $S_{us}$  no eixo das tensões médias no ponto A para traçar o diagrama de Goodman, que é estendido ao ponto C.

4. A partir da equação da linha de Goodman Pode-se agora determinar o valor da resistência à fadiga sob condições alternadas ( $R = 1$ ), que corresponde ao ponto C no diagrama.

Figura 11 – Diagrama de Goodman modificado de tensão torcional para fio redondo



Fonte: NORTON ( 2013)

Este uso da linha de Goodman é conservativo para razões de tensão  $R$  menor ou igual a 0. É justificado neste caso porque molas devem ser carregadas sempre na mesma direção. Molas helicoidais de compressão tendem a ter razões de tensão entre 0 e 0,8, o que coloca as suas coordenadas de tensão à direita da linha de 45 na figura, onde a linha de Goodman é mais conservativa que a linha de Gerber (NORTON, 2013).

## 2.5 Dimensionamento de molas helicoidais de compressão à fadiga

As falhas por fadiga são extremamente perigosas por não darem avisos prévios, como ocorre nas falhas por carregamento estático, em muitos casos é muito difícil de se prever por causa das condições impostas aos componentes estruturais (BUDYNAS; NISBETT, 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).

Devido a natureza rotativa de algumas máquinas as tensões flutuantes geralmente tomam a forma de ondas senoidais. Contudo, em algumas aplicações irregulares

padrões periódicos exibem um máximo e um único mínimo de força. Assim a forma da onda não é importante, porém os picos em ambos os lados alto (máximo) e baixo (mínimo) são importantes. Logo, a caracterização do padrão de ciclo de força pode ser determinada a partir de como a variação da força  $F_{min}$  e  $F_{max}$  assim como a variação da força acima e abaixo de uma linha de base (COLLINS, 2006, p.466).

Quando as molas são carregadas dinamicamente, ou seja, quando a carga varia com o tempo, uma situação de fadiga existe na mola. Uma mola carregada dinamicamente operará entre dois níveis de força:  $F_{min}$  e  $F_{max}$ . A partir desses valores pode se calcular a força média  $F_m$ , a força alternada  $F_a$  e uma razão de força  $R_f$ .

$$F_a = \frac{F_{max} - F_{min}}{2} \quad (14)$$

$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \quad (15)$$

$$R_f = \frac{F_{max}}{F_{min}} \quad (16)$$

Considerando que a relação entre as componentes médias e alternadas de tensão é aleatória ou desconhecida se tem o diagrama de Goodman ilustrado pela Figura 12.

O ponto D na curva de falha mais próximo do estado de tensões em E pode ser tomado como uma estimativa conservadora do ponto de falha. O segmento ED é ortogonal a CA, sendo assim, sua equação pode ser escrita e resolvida simultaneamente com a da curva CA para encontrar as coordenadas do ponto D e o comprimento ED, que são,

$$\tau_{m@D} = \frac{S_{us}(S_{es}^2 - S_{es}\tau_a + S_{us}\tau_m)}{S_{es}^2 + S_{us}^2} \quad (17)$$

$$\tau_{a@D} = -\frac{S_{es}}{S_{us}}(\tau_{m@D}) + S_{es} \quad (18)$$



poderoso ambiente computacional aberto para aplicações científicas. Distribuído gratuitamente via Internet desde 1994, o Scilab é atualmente usado em diversos ambientes industriais e educacionais pelo mundo.

O Matlab é uma ótima opção para os estudantes de engenharia e engenheiros que precisam resolver algum problema ou função, realizar uma simulação, fazer um teste estatístico ou visualizar um resultado.

### 3 METODOLOGIA

O programa escolhido para desenvolver a rotina computacional para o projeto de mola helicoidal para baja SAE foi o Scilab. Essa escolha se deu pela facilidade de programa em trabalhar com matrizes e problemas iterativos. Foi também elaborada uma interface gráfica com o mesmo para tornar o programa mais interativo, prático e rápido.

#### 3.1 Dados de entrada do programa

Os dados de entrada para a execução da rotina são referentes a carga que deve ser suportada pela mesma e suas dimensões, segue listados:

1. Constante de mola exigida pelo projeto;
2. Pré-carga utilizada para a montagem da mola;
3. Vida da mola em número de ciclos;
4. Comprimento do alojamento;
5. Diâmetro do amortecedor;
6. Curso de trabalho;
7. Formato da extremidade da mola.

Os dados necessários para os o cálculo da resistência a tração  $S_{ut}$  e dos diâmetros comerciais de fio foram importados de um arquivo .xml com os dados das Tabela 1 e Tabela 2.

#### 3.2 Cálculos iniciais

A partir dos dados de entrada, é calculado a deflexão inicial  $y_{inicial}$  e o limite de interferência  $y_{inter f}$  equivalente a 15% da deflexão de trabalho e o comprimento livre da mola, conforme recomendado por Norton (2013) e Collins (2006).

Com o valor da deflexão inicial e do curso de trabalho da mola é calculada a força máxima de trabalho  $F_{max}$ . Seguido da força alternada e média pelas equações, Equação 14 e Equação 15.

#### 3.3 Cálculo das tensões e das dimensões admissíveis

A partir dos dados iniciais e dos resultados obtidos anteriormente se deu início aos

cauculos :

1. Diâmetro médio da mola  $D_m$ ;
2. Índice de mola  $C$ ;
3. Fator de cisalhamento direto  $K_s$ ;
4. Fator de Wahl  $K_w$ ;
5. Tensão inicial  $\tau_i$ ;
6. Tensão média  $\tau_m$ ;
7. Tensão alternada  $\tau_a$ ;
8. Número de espiras ativas  $N_a$ ;
9. Número de espiras total  $N_t$ ;
10. Massa da mola  $G$  em Kg;

Para esses cálculos foi utilizado um "laço" dentro do código para que percorresse toda Tabela 1 e calculasse os índices de mola para todos os diâmetros. Em seguida se utiliza uma "condicional" para que o restante dos cálculos, a partir desse momento, sejam realizados apenas para os diâmetros cujo índice de mola estejam entre 4 e 12 de acordo com o que foi recomendado por Norton (2013) e Collins (2006).

Para o cálculo da massa da mola foi admitido que a densidade para aços liga  $\rho$  é de aproximadamente  $7,8 \times 10^3$  g/m<sup>3</sup>.

Em seguida, dentro do mesmo "laço", considerando que o módulo de cisalhamento ( $G$ ) para aços liga 80,8Mpa, é calculado o número de espiras ativas ( $N_a$ ), para cada diâmetro de fio selecionado, pela Equação 2.6.

Para o cálculo do número total de espiras é utilizado uma série de "condicionais" para cada forma de extremidade da mola conforme indicado na Figura 7. Com os resultados obtidos é calculado;

1. Comprimento da mola fechada  $L_s$ ;
2. Deflexão com a mola fechada  $y_{fechada}$ ;
3. Comprimento de trabalho para o determinado diâmetro  $L_a$ ;
4. Carga com a mola fechada  $F_{fechada}$ ;
5. Tensão com a mola fechada  $\tau_{fechada}$ .

Partindo do diâmetro do fio ( $d$ ) e do número de espiras ativas ( $N_a$ ) é calculado o passo da mola e seu ângulo de inclinação ( $\lambda$ ). Todos os valores obtidos são armazenados numa matriz ( $A$ ), tendo como base o índice de mola ( $C$ ), que deve pertencer ao intervalo entre 4 e 12, o ângulo de inclinação ( $\lambda$ ) que deve ser menor que  $12^\circ$  e o comprimento de trabalho calculado para os diâmetros preferenciais de fio que não deve ser maior que

comprimento de trabalho estabelecido pelo usuário.

### 3.4 Cálculo das propriedades e coeficiente de segurança para cada material

Com os diâmetros adequados é calculado através de dois "laços" o limite de resistência à tração  $S_{ut}$ , o limite de resistência à torção  $S_{us}$  e o limite de resistência ao escoamento por torção  $S_{ys}$  para os materiais contidos na Tabela 2.

Através de uma "condicional" é calculado o limite de resistência a tração  $S_{ut}$  para os intervalos de valores do diâmetro do fio pela Equação 2.1 dados os coeficientes indicados para cada material na Tabela 2 e o limite de resistência à torção  $S_{us}$  pela Equação 2.

A partir de uma "condicional" é calculado o limite de resistência ao escoamento por torção  $S_{ys}$  sendo que foi considerada a porcentagem máxima do limite de resistência à tração depois da remoção de deformação permanente para os materiais conforme os dados contidos na tabela ilustrada na Tabela 4.

O limite de resistência a fadiga  $S_{ew}$  ou a resistência a fadiga  $S_{fw}$  serão calculados, dependendo da vida da mola, em números de ciclos indicadas pelo usuário. Caso a vida da mola esteja entre o intervalo de  $103 < N < 107$  ciclos, serão utilizados os dados ilustrados na Tabela 5. Já para os cálculos da resistência a fadiga  $S_{fw}$  para uma vida finita, caso a vida da mola seja superior à esse intervalo, será utilizada a Equação 12 para o cálculo do limite de resistência a fadiga  $S_{ew}$ , considerando que a mola passará pelo processo de jateamento, para uma vida infinita. Assim utilizando a Equação 17, Equação 18, Equação 19, Equação 21 e Equação 20. Calculamos o limite de resistência a fadiga para cada material.

Após encontrar as propriedades do material se encontram as tensões alternadas e as médias do ponto D localizado na reta  $S_{es} - S_{ut}$  no diagrama de Goodman, como indicado na Figura 12, utilizando a Equação 18 e Equação 17. Sabendo que as coordenadas do ponto E são dadas pelos valores da tensão alternada e média para cada diâmetro do fio, é calculado o comprimento dos segmentos ED e EF pela Equação 19 e Equação 21, sendo F o ponto indicado pela tensão inicial.

Em seguida, calcula-se também a menor distância do ponto E à reta  $S_{ys} - S_{ys}$ , segmento EG. Caso o ponto E estiver mais próximo da reta  $S_{ys} - S_{ys}$  do que da reta  $S_{es} - S_{ut}$ , o valor de ED deve ser substituído pelo valor de EG na Equação 20 para o cálculo do fator de segurança à fadiga.

Como há a possibilidade do ponto E, determinado pela tensão média e alternada

no diagrama de Goodman, estar localizado fora da região segura delimitadas pelas retas  $S_{ys}$  –  $S_{ys}$  e  $S_{es} - S_{ut}$ , foi elaborada uma "condicional" para verificar essa hipótese. Para isso, utiliza-se o valor da tensão média para um determinado diâmetro de fio na equação das retas, se o valor obtido for maior ou igual ao da tensão alternada correspondente ao mesmo diâmetro, isso implica que o ponto estará abaixo ou pertencerá à reta  $S_{es} - S_{ut}$ .

Logo a condicional assumirá o valor "Verdadeiro", se o valor assumido pela condicional for "falso" o coeficiente de segurança para aquele determinado diâmetro de fio e material receberá o valor de zero.

Todos os valores descritos nessa seção são armazenados em uma matriz tridimensional que guarda os valores referentes aos materiais em diferentes "camadas". Assim, estabelecendo a "condicional" para os valores do coeficiente de segurança maiores do que 1,0 são importados os dados admissíveis para o projeto e para matrizes referentes a cada material.

### 3.5 Análise de flambagem

Como molas de extremidades inclinadas tendem flambar com uma razão de aspecto menor que aquela que está mantida com extremidades paralelas, como mostrado na Figura 10, foi admitido que a mola dimensionada apresentará extremidades paralelas.

Utilizando o software Webplotdigitizer foi obtido a equação 3.5 que se trata de uma aproximação à curva de condições críticas de flambagem ilustrada na Figura 10 para extremidades paralelas, tipo adotado no programa.

$$R_{estavel} = 4.6686e^{(-0.408 L_f/D)} \quad (22)$$

Assim, se o valor de  $R_{estavel}$  for maior que a razão  $y/L_f$  a mola não estará sujeita a flambagem e será indicado no programa.

### 3.6 Validação de Resultados

Objetivando validar a rotina computacional e destacar sua eficiência no dimensionamento de molas helicoidais de compressão será solucionando o exemplo 14-4, proposto por uma bibliografia consagrado Norton (2013). Convertendo os dados do exemplo para o

Sistema Internacional de Medidas.

Utilizando os dados da primeira parte do exemplo; onde Norton (2013) considera um valor de índice de mola igual à 9; e alterando o valor do diâmetro do fio para o valor aproximado ao utilizado no exemplo, temos os dados de entrada exibidos na Tabela 6 e os resultados obtidos são demonstrados na Figura 14.

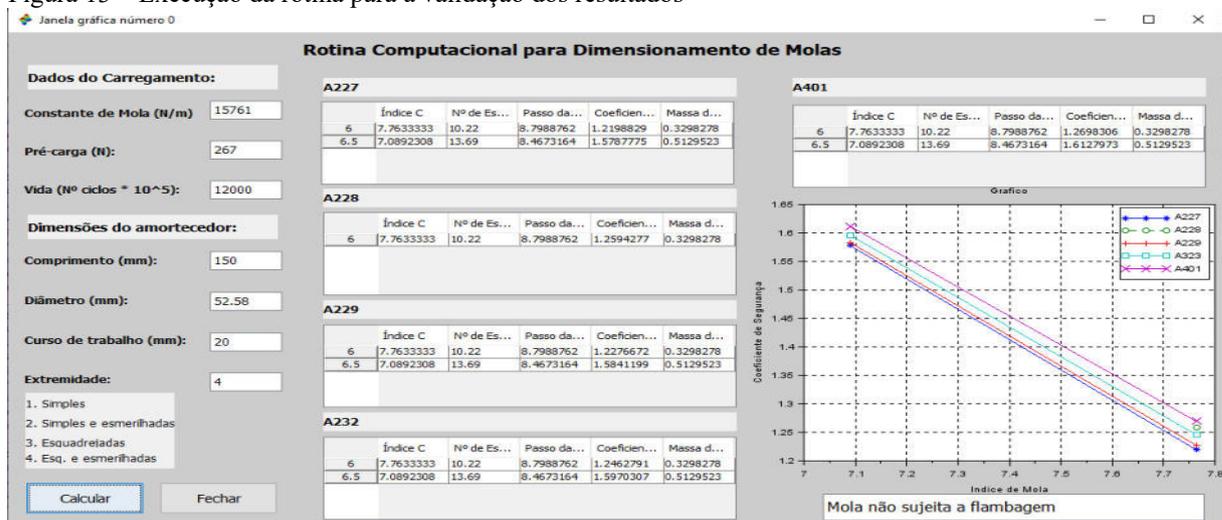
Tabela 6 – Dados para a validação de resultados

Dados Necessários	Valores
Contante de Mola (N/m)	15761
Pré-carga (N)	267
Vida ma mola	$12 \cdot 10^9$
Comprimento do alojamento (mm)	150
Diâmetro do amortecedor (mm)	52.58
Curso do amortecedor (mm)	20
Esquadrejada e esmerilhadas	

Fonte: Autor

Utilizando os dados diretamente no código fonte da rotina para ter acesso a mais resultados, tem-se o comparativo entre os resultados obtidos pela rotina e os resultados do exemplo exibidos para o mesmo material, A228, na Tabela 7.

Figura 13 – Execução da rotina para a validação dos resultados



Fonte: Autor

Tabela 7 – Resultados do Exemplo x Resultados obtidos

<b>Resultados</b>		
<b>A228</b>	<b>Exemplo</b>	<b>Rotina</b>
Diâmetro do fio(mm)	5,26	5,26
Índice de Mola	9	8,99
Tensão Inicial (Mpa)	233,56	233,36
Tensão Média (Mpa)	408,73	408,31
Tensão alternada (Mpa)	192,84	192,61
S <sub>ut</sub> (Mpa)	1644,45	1644,31
S <sub>us</sub> (Mpa)	1101,78	1101,69
S <sub>ys</sub> (Mpa)	986,67	986,58
N <sub>fs</sub>	1,0	0,84

Fonte: Autor

Ainda objetivando a validação dos resultados obtidos, utilizando os dados da segunda parte do exemplo onde Norton (2013). Considerando um índice de mola igual a 7, tem-se os dados de entrada mostrados na Tabela 8. E os resultados obtidos pela rotina estão exibidos na Figura 15.

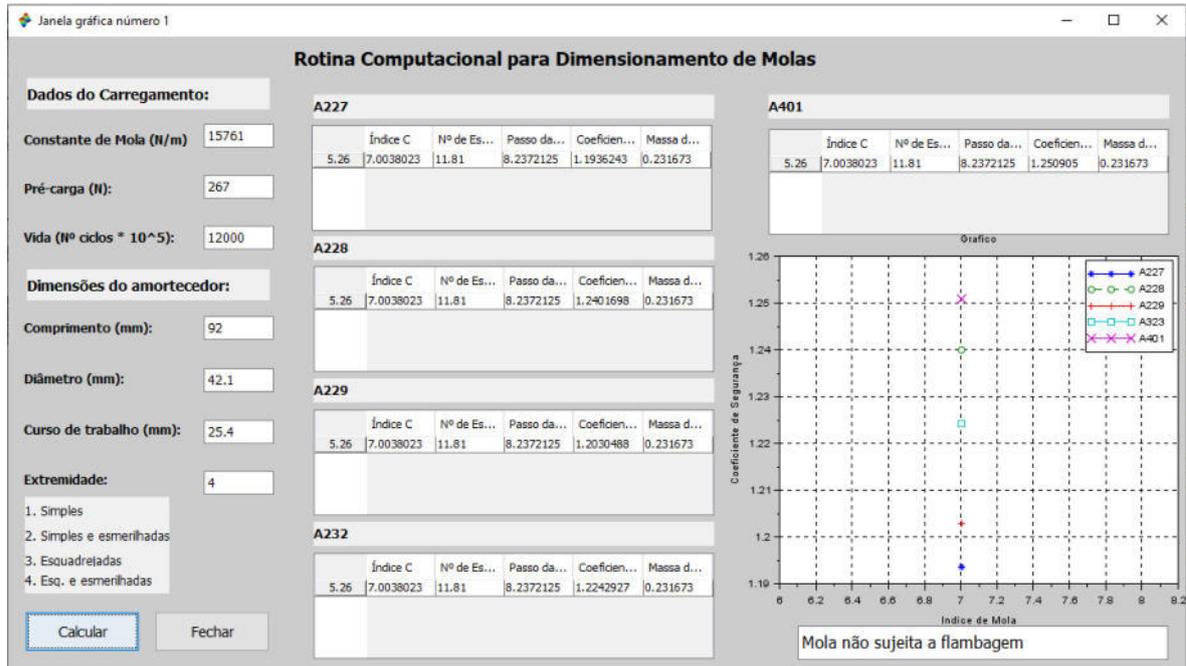
Após a segunda validação de resultados se tem o comparativo para o mesmo material exibido na Tabela 9. Analisando os resultados da Tabela 7 e da Tabela 9 observa-se que há pequenas diferenças entre os resultados do exemplo e os da rotina, sendo estas atribuídas aos arredondamentos nos dois casos.

Tabela 8 – Dados para a 2a validação de resultados

<b>Dados Necessários</b>	<b>Valores</b>
Contante de Mola (N/m)	15761
Pré-carga (N)	267
Vida ma mola	12*10 <sup>9</sup>
Comprimento do alojamento (mm)	92
Diâmetro do amortecedor (mm)	42.1
Curso do amortecedor (mm)	25.4
Esquadrejada e esmerilhadas	

Fonte: Autor

Figura 14 – 2ª Execução da rotina para a validação dos resultados



Fonte: Autor

Tabela 9 – Resultados do Exemplo x Resultados obtidos

Resultados		
A228	Exemplo	Rotina
Diâmetro do fio(mm)	5,26	5,26
Índice de Mola	7	7
Tensão Inicial (Mpa)	184,38	184,40
Tensão Média (Mpa)	156,54	156,48
Tensão alternada (Mpa)	322,67	322,64
Número Total de espiras	11,75	11,80
N <sub>fs</sub>	1,3	1,24

Fonte: Autor

Apesar da pequena diferença entre os valores referentes ao coeficiente de segurança à fadiga, não se pode utiliza-los para validar os resultados obtidos, pois no exemplo de Norton (2013) o coeficiente de segurança a fadiga é calculado considerando que qualquer aumento no carregamento será uma razão constante entre os componentes alternados e a média de tensão será mantida.

Uma vez que a rotina calcula o coeficiente de segurança à fadiga para uma razão constante entre as componentes alternada e média de tensão aleatória, há a necessidade da validação ser feita por cálculos analíticos, o que foi feito para o coeficiente de segurança à fadiga e os demais resultados obtidos.

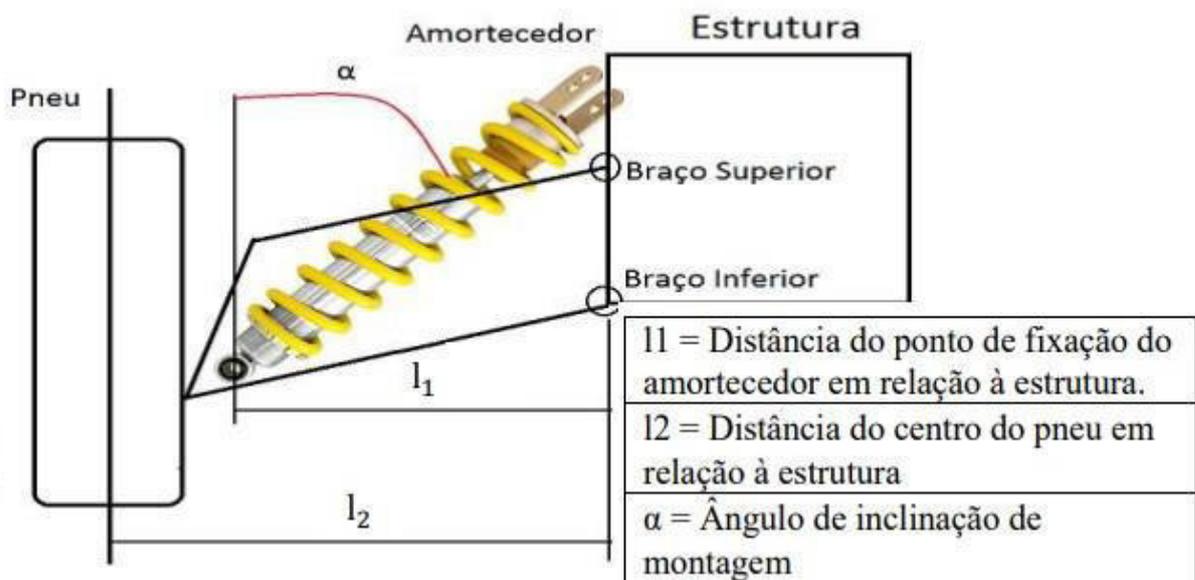
### 3.7 Estudo de caso

Como forma de ilustrar melhor o funcionamento do programa, foi desenvolvido um estudo de caso. Considerando uma situação hipotética em que a mola dimensionada será utilizada na suspensão dianteira de um veículo baja SAE onde o conjunto "baja + piloto" tem uma massa de aproximadamente 200 Kg, assumindo que 40% do peso do conjunto será distribuído igualmente entre as rodas dianteiras, admitindo que a massa não suspensa será de 12Kg e que a frequência de trabalho é de 1,8Hz.

Com relação às dimensões do amortecedor foi considerado um comprimento de trabalho da mola de 350 mm, o diâmetro do amortecedor igual à 90 mm e um curso de trabalho de 100 mm.

Na montagem do sistema de suspensão Figura 16, considera-se que a distância do ponto de fixação do amortecedor em relação à estrutura  $L_1$  é igual a 260 mm, a distância do centro do pneu em relação à estrutura  $L_2$  é de 380mm e um Ângulo de inclinação de montagem de  $30^\circ$ .

Figura 15 – Montagem do sistema de suspensão dianteiro



Fonte: NICANOR G. A.; MAZZONI( 2016)

Para essas condições temos que os parâmetros de entrada ficaram em torno dos

exibidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados para o estudo de caso

<b>Dados Necessários</b>	<b>Valores</b>
Contante de Mola (N/m)	10200
Pré-carga (N)	660
Vida ma mola	$10 \cdot 10^5$
Comprimento do alojamento (mm)	350
Diâmetro do amortecedor (mm)	90

Fonte: Autor

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Após estudos sobre o ambiente Scilab foi desenvolvida uma rotina computacional em conjunto com uma interface gráfica nesse ambiente (apêndice A), para o dimensionamento de molas helicoidais de compressão com diâmetro de espira constante, passo constante e seção de fio circular de extremidades paralelas, sem jateamento de esferas que possam ser utilizadas em um veículo off-road baja SAE.

A interface da rotina é mostrada na Figura 13, nela estão os campos que serão preenchidos pelo usuário, os campos destinados a exibição dos dados obtidos para os materiais utilizados no dimensionamento da mola e um gráfico para melhor comparação dos resultados.

Os únicos campos editáveis são os localizados à esquerda para que não haja equívocos na utilização do programa. O programa realiza as iterações necessárias para o dimensionamento de mola com base nos materiais cujas propriedades estão presentes na bibliografia, que são o aço ASTM A227, ASTM A228, ASTM A229, ASTM A232 e ASTM A401.

Nos campos maiores será exibido uma tabela com os diâmetros de fio  $d$ , índice de mola  $C$ , o numero total de espiras  $N_t$ , o passo das espiras  $p$ , o coeficiente de segurança admissíveis e a massa da mola  $W$  para cada material caso o mesmo atenda as condições de contorno estipuladas pelo usuário. Caso algum material não atenda as condições de contorno o campo dedicado a ele na interface continuará vazio. O principal critério utilizado no programa é que o coeficiente de segurança a fadiga  $N_f$  para a mola seja maior do que 1,0.

Figura 16 – Interface gráfica do programa

Fonte: Autor

O campo na extremidade inferior esquerda é destinado a exibição de um gráfico que relaciona o coeficiente de segurança  $N_t$  ao índice de mola  $C$  admissíveis para cada material. O gráfico auxilia o usuário numa melhor interpretação do desempenho de cada material para a condição estabelecida.

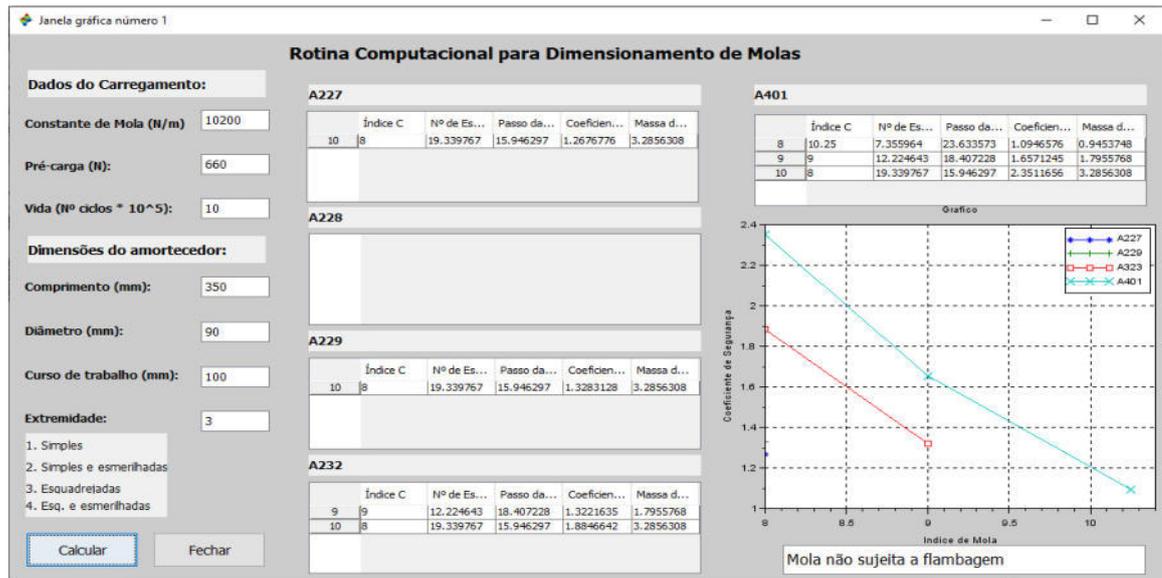
Abaixo dos campos destinados aos resultados está o campo que indicará se a mola dimensionada está sujeita ou não a flambagem e caberá ao usuário opinar por um projeto diferente ou a utilização de artifício para evitar a flambagem.

#### 4.1 Estudo de caso

Ao preencher o campos com o valores indicados e clicar no botão calcular o programa exibirá os seguintes resultados da Figura 17.

Os resultados obtidos para cada material utilizada seguem nas Tabelas 4, 5, 6 e 7. De imediato nota-se que não há resultado para o fio de aço ASTM A228, isso significa que o material não atende as condições de projeto. Nesse caso, isso se deve ao fato do que os diâmetros utilizados não estão dentro do intervalo estipulado para o material na Tabela 2 para o calculo do limite de resistência à tração.

Figura 17 – Dados obtidos no estudo de caso



Fonte: Autor

Tabela 11 – Dados obtidos para o ASTM A227

<b>Material: ASTM A227</b>					
Diâmetro do fio (mm)	índice C	Nº de espiras total	Passo da mola (mm)	Coeficiente de Segurança	Massa da mola (Kg)
10	8.0000	21.3000	15.9463	1.26778	3.2795

Fonte: Autor

Tabela 12 – Dados obtidos para o ASTM A229

<b>Material: ASTM A229</b>					
Diâmetro do fio (mm)	índice C	Nº de espiras total	Passo da mola (mm)	Coeficiente de Segurança	Massa da mola (Kg)
10	8.0000	21.3000	15.9463	1.3283	3.2795

Fonte: Autor

Tabela 13 – Dados obtidos para o ASTM A232

<b>Material: ASTM A232</b>					
Diâmetro do fio (mm)	índice C	Nº de espiras total	Passo da mola (mm)	Coeficiente de Segurança	Massa da mola (Kg)
09	9.0000	14.2000	18.4072	1.3222	1.7931
10	8.0000	21.3000	15.9463	1.8847	3.2795

Fonte: Autor

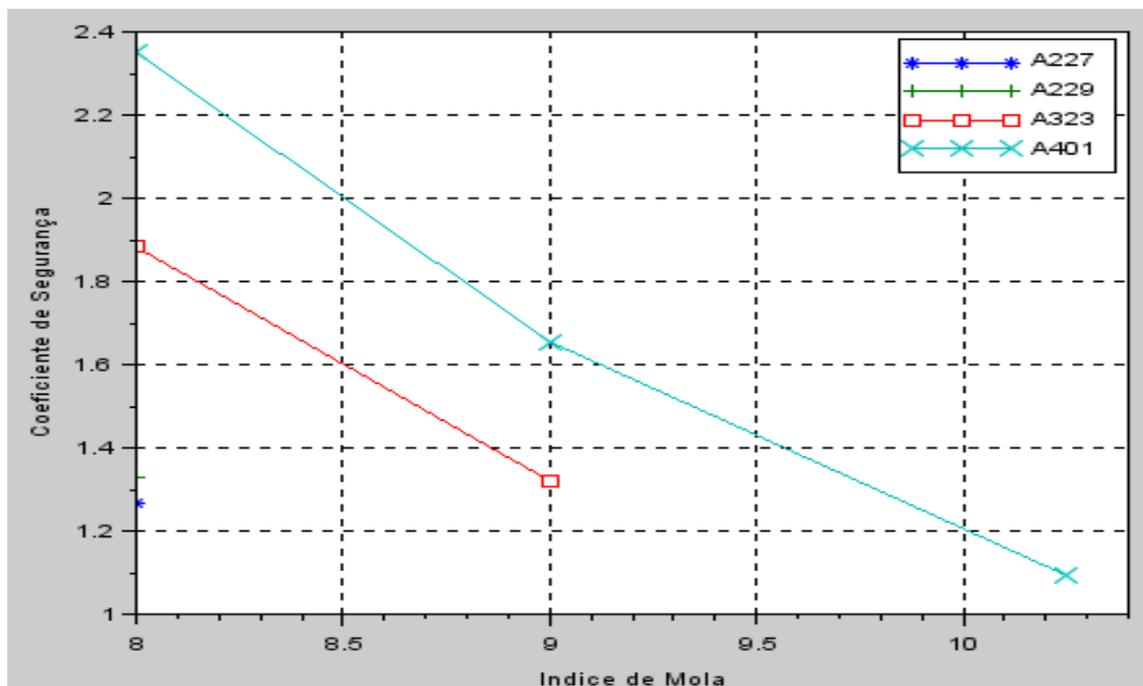
Tabela 14 – Dados obtidos para o ASTM A401

<b>Material: ASTM A401</b>					
<b>Diâmetro do fio (mm)</b>	<b>índice C</b>	<b>Nº de espiras total</b>	<b>Passo da mola (mm)</b>	<b>Coefficiente de Segurança</b>	<b>Massa da mola (Kg)</b>
08	10.2500	9.4000	23.6336	1.0947	0.9494
09	9.0000	14.2000	18.4072	1.6571	1.7931
10	8.0000	21.3000	15.9463	2.3512	3.2795

Fonte: Autor

O programa também cria o seguinte gráfico mostrado na Figura 18 com os dados das tabelas.

Figura 18 – Gráfico C- Nsf do estudo de caso



Fonte: Autor

No gráfico podemos observar que os valores do coeficiente de segurança à fadiga para uma vida de  $10^6$  ciclos para o ASTM A227 e A229 estão muito próximos assim como o ASTM A323 do A401. Isso ocorre por conta da porcentagem máxima do limite de resistência a tração utilizada para calcular a resistência ao escoamento torcional. Nota-se também que os dois primeiros apresentam menores coeficientes de segurança para os mesmos diâmetros de fio, além de ter apenas um diâmetro que atenderia as condições estabelecidas pelo usuário.

No gráfico é observada uma característica citada na fundamentação teórica, a redução do coeficiente de segurança com o aumento do índice de mola. Isso se deve ao fato de que ao reduzir-mos o índice C, temos o aumento do diâmetro do fio ou redução do

diâmetro da mola. Como o diâmetro da mola permanece fixo o aumento da área da seção transversal do fio faz com que as tensões sejam reduzidas.

Os maiores coeficientes de segurança para os materiais A232 e A401 são justificados pela Equação 1 uma vez que de acordo com a Tabela 2 apresentam maiores coeficientes A e expoentes b, tendo assim maior limite de resistência a tração.

Nota-se também que o fator dimensão é o de maior influencia com relação restrição de diâmetros de fios que poderiam ser utilizados no dimensionamento da mola, por isso se torna necessário uma melhor análise de todo o sistema de suspensão.

Na Tabela 14 temos que o menor diâmetro de fio admissível para o A401, implica em uma menor massa, porém o valor do coeficiente de segurança está muito próximo de 1,0, o que leva a desconsiderar esse resultado.

Com as informações do gráfico é possível analisar qual o melhor custo benefício na escolha do material para a fabricação da mola. Após mais alguns teste se nota que para valores em torno às condições determinadas dificilmente, os materiais englobados pelo programa atenderiam as condições de contorno.

## 5 CONCLUSÕES

Por meio de uma pesquisa bibliográfica, tornou-se possível a elaboração da rotina computacional para o projeto de mola. A interface gráfica criada tornou a utilização do programa mais amigável, fácil e intuitiva para o usuário.

Pela definição da geometria da mola e as condições de carga é possível determinar elementos para o desenvolvimento de uma mola para suspensão, que atenda as condições exigidas. Pelos cálculos analíticos de fadiga, utilizando os critérios de Goodman, pode-se achar uma serie de combinações entre o diâmetro do fio e materiais que atendam as condições do projeto.

A rotina possibilita uma análise rápida e intuitiva sobre a influencia das dimensões e carregamento que uma mola tem sobre os outros parâmetros do projeto, como por exemplo, nas tensões desenvolvidas ao longo da vida da mola.

Há a possibilidade da utilização do programa para buscar um melhor custo benefício, de forma rápida, para a fabricação de molas, uma vez que os materiais utilizados apresentam custos relativos distintos.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Implementar mais materiais na programa, para que no caso de uma biblioteca maior seja possível atender condições de carregamento maiores, podendo ser utilizado em outras aplicações.
- Aprimorar a rotina para que possa dimensionar um sistema de suspensão abrangendo os aspectos vibracionais para que não falhe por ressonância.

## REFERÊNCIAS

- BARBOSA, M. **Modelagem Multi-corpos de um Veículo Baja SAE e Estudo de Sua Dinâmica Vertical**. 2016. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — USP, São Carlos - SP, 2016.
- BRANCO, C. **Mecânica dos materiais**. [S.l.]: Fundação Calouste Gulbenkian., 2006.
- BUDYNAS, R.; NISBETT, J. **Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica**. [S.l.]: AMGH, 2011. v. 8<sup>a</sup> ed.
- COLLINS, J. A. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma Perspectiva de Prevenção de falha**. [S.l.]: LTC, 2006.
- FREITAS, L. **Estudo da Dinâmica Vertical de uma Suspensão do tipo MacPherson**. 2006, 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — USP, São Carlos - SP, 2006.
- GENTA G.; MORELLO, L. **The Automotive Chassis: Components Design**. [S.l.]: Dordrecht: Springer, 2009. v. 1.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. [S.l.]: Society of Automotive Engineers., 1992.
- IEZZO, R. **Desenvolvimento de um Sistema de Suspensão com Amortecimento Semi-ativo “Slow-active” com Custo Competitivo**. 2010, 317 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — UNICAMP, Campinas - SP, 2010.
- JAZAR, R. **Vehicle Dynamics: Theory and Application**. [S.l.]: Springer, 2008. New York, USA.
- MELCONIAN, S. **Elementos de Máquinas**. [S.l.]: Érica, 2009. v. 9<sup>a</sup> Edição Revisada.
- NICANOR G. A., C. R. S.; MAZZONI, U. R. Análise dinâmica da suspensão de um veículo mini baja SAE. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 8, n. 3, p. 1–13, 2016.
- NICOLAZZI, L.; ROSA, E. **Introdução à modelagem quase-estática de veículos automotores de rodas**. [S.l.]: Publicação interna do GRANTE - Depto de Engenharia Mecânica da UFSC, 2001. Brasil.
- NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. [S.l.]: Bookman, 2013.
- SOUSA, N. M. **Projeto Estrutural de Mola Helicoidais de Compressão Utilizando o Programa Microsoft Excel**. 2017, 61 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá - SP, 2017. v. 4<sup>a</sup> edição.
- WAHL, A. M. **Mechanical Springs**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1963.

ZIMMERLI, F. P. **Human Failures in Spring Design.** [S.l.]: The Mainspring, Associated Spring Corp., 1957. Aug.-Sept.

**APÊNDICE A – ROTINA COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO  
DE MOLAS HELICOIDAIIS SUJEITAS À FADIGA.**

0001 //TCC - Rotina computacional para o projeto de mola de compressão

0002 //Acadêmico: João Pedro Rorigues Deodato

0003 //Curso: Engenharia Mecânica - 10º Semestre

0004 //////////////

0005

f=figure('figure\_position',[38,17],'figure\_size',[1142,648],'auto\_resize','on','background',[33],'figure\_name','Janela

gráfica número

%d','dockable','off','infobar\_visible','off','toolbar\_visible','off','menubar\_visible','off','default\_axes','on','visibl

0006 //////////////

0007 handles.dummy = 0;

0008

handles.calcular=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],'Enable','on','FontAngle','normal','FontN

0009

handles.fechar=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],'Enable','on','FontAngle','normal','FontNam

0010

handles.constante=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],'Enable','on','FontAngle','normal','Font

0011

```
handles.texto1=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],'Enable','on','FontAngle','normal','Font
```

```
de Mola (N/
```

```
m):','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','texto1','Callback','")
```

```
0012
```

```
handles.texto2=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],'Enable','on','FontAngle','normal','Font
```

```
carga
```

```
(N):','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','texto2','Callback','")
```

```
0013
```

```
handles.texto3=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],'Enable','on','FontAngle','normal','Font
```

```
(N° ciclos *
```

```
10^5):','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','texto3','Callback','")
```

```
0014
```

```
handles.texto4=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],'Enable','on','FontAngle','normal','Font
```

```
(mm):','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','texto4','Callback','")
```

```
0015
```

```
handles.texto5=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],'Enable','on','FontAngle','normal','Font
```

```
(mm):','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','texto5','Callback','")
```

0016

```
handles.texto6=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],'Enable','on','FontAngle','normal','Font
```

de trabalho

```
(mm):','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','texto6','Callback',';')
```

0017

```
handles.texto7=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],'Enable','on','FontAngle','normal','Font
```

0018

```
handles.precarga=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],'Enable','on','FontAngle','normal','FontN
```

0019

```
handles.vida=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],'Enable','on','FontAngle','normal','FontName'
```

0020

```
handles.comprimento=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],'Enable','on','FontAngle','normal','Fo
```

0021

```
handles.diametro=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],'Enable','on','FontAngle','normal','FontN
```

0022

```
handles.curso=uicontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],'Enable','on','FontAngle','normal','FontName
```

0023

```
handles.extremidade=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],
'Enable','on','FontAngle','normal','Fo
```

0024

```
handles.titulo=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[0.8,0.8,0.8],
'Enable','on','FontAngle','normal','Font
```

Computacional para Dimensionamento de

```
Molas','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','titulo','Callback',
")
```

0025

```
handles.texto8=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],
'Enable','on','FontAngle','normal','FontNam
```

do

```
Carregamento:','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','texto8','
Callback','")
```

0026

```
handles.texto9=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],
'Enable','on','FontAngle','normal','FontNam
```

do

```
amortecedor:','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','texto9','C
allback','")
```

0027

```
handles.texto10=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],
'Enable','on','FontAngle','normal','FontNa
```

```
Simples','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','texto10','Callb
ack','")
```

0028

```
handles.texto11=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],
'Enable','on','FontAngle','normal','FontNa
```

Simple e

```
esmerilhadas','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','texto11','
Callback','")
```

0029

```
handles.texto12=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],
'Enable','on','FontAngle','normal','FontNa
```

```
Esquadrejadas','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','texto12',
'Callback','")
```

0030

```
handles.texto13=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],
'Enable','on','FontAngle','normal','FontNa
```

Esq. e

```
esmerilhadas','Style','text','Value',[0],'VerticalAlignment','middle','Visible','on','Tag','texto13','
Callback','")
```

0031

```
handles.A227=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],
'Enable','on','FontAngle','normal','FontName'
```

0032

```
handles.A228=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],
'Enable','on','FontAngle','normal','FontName'
```

0033

```
handles.A229=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],
'Enable','on','FontAngle','normal','FontName'
```

0034

```
handles.A232=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],  
'Enable','on','FontAngle','normal','FontName'
```

0035

```
handles.A401=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],  
'Enable','on','FontAngle','normal','FontName'
```

0036

```
handles.grafico1= newaxes();handles.grafico1.margins = [ 0 0 0  
0];handles.grafico1.axes_bounds = [0.6549911,0.3480742,0
```

0037

```
handles.texto13=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],  
'Enable','on','FontAngle','normal','FontNa
```

0038

```
handles.texto15=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],  
'Enable','on','FontAngle','normal','FontNa
```

0039

```
handles.texto16=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],  
'Enable','on','FontAngle','normal','FontNa
```

0040

```
handles.texto17=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],  
'Enable','on','FontAngle','normal','FontNa
```

0041

```
handles.texto18=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],  
'Enable','on','FontAngle','normal','FontNa
```

0042

```
handles.flambagem=icontrol(f,'unit','normalized','BackgroundColor',[-1,-1,-1],  
'Enable','on','FontAngle','normal','Font
```

0043

0044 f.visible = "on";

0045

0046 //////////

0047 // Callbacks are defined as below. Please do not delete the comments as it will be used  
in coming

version

0048 //////////

0049

0050 function calcular\_callback(handles)

0051 //Write your callback for calcular here

0052 clc;

0053 //Dados do Carregamento

0054

0001 v1=handles.constante.string

0002 v2=handles.precarga.string

0003 v3=handles.vida.string

0004 v4=handles.extremidade.string

0005 v5=handles.diametro.string

0006 v6=handles.comprimento.string

0007 v7=handles.curso.string

0008

0009 K=strtod(v1)//Constante de mola(N/m)

```
0010 F_min=strtod(v2) //Força mínima(N)=Pré-carga
0011 N_vida=strtod(v3)*10^5 //Vida de mola(Ciclos)
0012 ext=strtod(v4) //Formato da Extremidade
0013
0014 //Dados de alojamento
0015
0016 D_ext=strtod(v5)/1000 //Diâmetro externo das espiras(m)
0017 L_a=strtod(v6)/1000 //Comprimento livre (m)
0018 y=strtod(v7)/1000 //Deflexão (m)
0019
0020 G=80.8*10^9 //Módulo de rigidez para aços liga
0021 dens=7.8*10^3; //Kg/m^3
0022
0023 //Calculos iniciais
0024
0025 y_inicial=F_min/K; //Deflexão inicial
0026 y_interf=y*0.15; //Tolerância de contato de 15% da deflexão de trabalho
0027
0028 F_max=K*y+F_min;
0029
0030 L_f=L_a+y_inicial; //Comprimento livre da mola
0031
0032 //Verificar Flambagem
```

0033

0034  $r_{ld} = L_f / D_{ext}$ ; //Razão 1 - flambagem

0035  $r_{ly} = y / L_f$ ; //Razão 2 - flambagem

0036

0037  $R = 4.6686 * \exp(-0.408 * r_{ld})$ ; //Equação Flambagem

0038

0039 if  $r_{ly} > R$

0040 handles.flambagem.string=string('Mola sujeita a flambagem')

0041 else

0042 handles.flambagem.string=string('Mola não sujeita a flambagem')

0043 end

0044

0045 //2 - Forças média e alternada

0046

0047  $F_a = (F_{max} - F_{min}) / 2$ ; //Força alternada

0048  $F_m = (F_{max} + F_{min}) / 2$ ; //Força média

0049

0050 //Calculo das propriedades do material

0051

0052 tabelafio = readxls('fio.xls');

0053 tabelacoef = readxls('coeficientes.xls');

0054  $s1 = \text{tabelafio}(1)$ ;

0055  $s2 = \text{tabelacoef}(1)$ ;

```
0056 A=s1(:,:);
0057 B=s2(:,:);
0058
0059 //1º laço definição da dimensão%
0060
0061 cont=1 //Contador auxiliar
0062
0063 for i=1:44
0064
0065 d=A(i,2)/1000; //Diâmetro do fio em metros
0066 D_m=D_ext-d; //Diâmetro médio da espira em metros
0067 c=D_m/d; //Indice de mola
0068
0069 if c>=4 && c<=12 //Condicional 1 valores do indice de mola
0070 A(i,3)=c; //Criar coluna com os valores do indice de mola
0071
0072 k_s=1+0.5/c; //Fator de cisalhamento direto
0073 A(i,4)=k_s; //Coluna valores fatro de cisalhamneto direto
0074
0075 t_i=k_s*8*F_min*D_m/(%pi*d^3); //Tensão inicial
0076 A(i,5)=t_i; //Coluna Tensão inicial
0077
0078 t_m=k_s*8*F_m*D_m/(%pi*d^3); //Tensão média
```

```
0079 A(i,6)=t_m; //Coluna tensão média
0080
0081 k_w=(4*c-1)/(4*c-4)+0.615/c; //Fator de Wahl
0082 A(i,7)=k_w;
0083
0084 t_a=k_w*8*F_a*D_m/(%pi*d^3); //Tensão de cisalhamento alternada
0085 A(i,8)=t_a; //Coluna tensão de cisalhamento alternada
0086
0087 n_a=(d^4*G)/(8*(D_m^3)*K); //Numero de espiras ativas
0088 A(i,9)=n_a;
0089
0090 if ext==1
0091 n_t=round(n_a*10^2)/10^2; //Extremidades simples
0092 A(i,11)=n_t;
0093 elseif ext==2
0094 n_t=(round(n_a*10^2)/10^2)+1; //Extremidades simples e esmerilhadas
0095 A(i,11)=n_a;
0096 elseif ext==3
0097 n_t=(round(n_a*10^2)/10^2)+2; //Extremidades esquadrejadas
0098 A(i,11)=n_a;
0099 else
0100 n_t=(round(n_a*10^2)/10^2)+2; //Extremidades esquadrejadas e esmerilhadas
0101 A(i,11)=n_t;
```

```
0102 end

0103

0104 W=(%pi^2*d^2*D_m*n_t*dens)/4; // Cálculo da massa

0105 A(i,17)=W;

0106

0107 L_s=d*n_t; //comprimento mola fechada

0108 A(i,12)=L_s;

0109

0110 y_fechada=L_f-L_s; //Deflexão mola fechada

0111

0112 L_ar=L_s+y_interf+y; //Comprimento da mola montada

0113 A(i,13)=L_ar;

0114

0115 F_fechada=K*y_fechada; //Carga mola fechada

0116 A(i,16)=F_fechada;

0117

0118 t_fechada=(k_s*8*F_fechada*D_m)/(%pi*d^3); //Tensão comprimento fechado

0119 A(i,10)=t_fechada;

0120

0121 p=d+1.15*y/n_a; //Passo da espira

0122 A(i,14)=p*1000;

0123

0124 inc=atand(p/(%pi*D_m)); //Inclinação das espiras em graus
```

```
0125 A(i,15)=inc;

0126

0127 if L_ar<=L_a && inc<12 //Condições das dimensões da mola

0128 A2(cont,:)=A(i,:);

0129 cont=cont+1;

0130 end

0131

0132 end

0133 end

0134

0135 [linhas,colunas]=size(A2); //Tamanho matriz A2

0136

0137 //Matrizes auxiliares

0138

0139 S_UT=A2(:,2); //Matriz limite de resistência a tração

0140 S_US=A2(:,2); //Matriz limite de resistência ao cisalhamento

0141 S_YS=A2(:,2); //Matriz resistência de escoamento por torção

0142 S_ES=A2(:,2); //Matriz limite de duração para molas jateadas

0143

0144 A3=[A2(:,2),A2(:,3),A2(:,11),A2(:,14),zeros(linhas,1),A2(:,17)] //Matriz bases materiais

0145

0146 MATFINAL=zeros(linhas,6,5)

0147
```

```
0148 for l=1:5 //Calculo das propriedades
0149 f(l)=1
0150 MATERIAL(:,l)=A3
0151 Z(l)=1
0152 for j=1:linhas
0153 if A2(j,2)>=B(1,1) & A2(j,2)<=B(1,2) //Calculo do limite de resistência a tração
0154
0155 a=B(1,6) //Coeficiente A
0156 b=B(1,5) //Expoente b
0157 d=A2(j,2) //Diâmetro do fio
0158 s_ut=(a*10^6)*d^b //Limite de resistência a tração
0159 S_UT(j,l+1)=s_ut //Matriz limite de resistência a tração
0160
0161 s_us=0.67*s_ut //Limite de resistência ao cisalhamento
0162 S_US(j,l+1)=s_us //Matriz limite de resistência ao cisalhamento
0163
0164 if l<=3 // Condicional Resistência a Fadiga de acordo com o intervalo
0165 if N_vida<=10^5
0166 s_e=0.36*s_ut
0167 elseif N_vida>10^5 && N_vida<=10^6
0168 s_e=0.33*s_ut
0169 elseif N_vida>10^6 && N_vida<=10^7
0170 s_e=0.30*s_ut
```

```
0171 elseif N_vida>10^7

0172 s_e=465*10^6 //Limite de resistência a fadiga torcional para molas não jateadas
(Pa)

0173 end

0174 else

0175 if N_vida<=10^5

0176 s_e=0.42*s_ut

0177 elseif N_vida>10^5 && N_vida<=10^6

0178 s_e=0.40*s_ut

0179 elseif N_vida>10^6 && N_vida<=10^7

0180 s_e=0.38*s_ut

0181 elseif N_vida>10^7

0182 s_e=465*10^6 //Limite de resistência a fadiga torcional para molas não jateadas
(Pa)

0183 end

0184 end

0185

0186 if l<=2

0187 s_ys=0.60*s_ut //Resistência de escoamento por torção

0188 S_YS(j,l+1)=s_ys //Matriz esistência de escoamento por torção

0189 else

0190 s_ys=0.65*s_ut //Resistência de escoamento por torção

0191 S_YS(j,l+1)=s_ys //Matriz esistência de escoamento por torção
```

0192 end

0193

0194  $s\_es=(0.5*s\_e*s\_us)/(s\_us-0.5*s\_e)$  //Limite de duração para molas jateadas

0195  $S\_ES(j,l+1)=s\_es$  //Matriz limite de duração para molas jateadas

0196

0197 //Calculo da distancia entre o ponto E e a linha de Goodman (Ponto D)

0198

0199  $t\_md=(s\_us*(s\_es^2-s\_es*A2(j,8)+s\_us*A2(j,6)))/(s\_es^2+s\_us^2)$  //Tensão média no ponto D

0200  $T\_MD(j,l)=t\_md$

0201

0202  $t\_ad=-(s\_es/s\_us)*t\_md+s\_es$  //Tensão alternada no ponto D

0203  $T\_AD(j,l)=t\_ad$

0204

0205  $fe=\sqrt{(A2(j,6)-A2(j,5))^2+(A2(j,8))^2}$  //Distancia entre os pontos F e E

0206  $FE(j,l)=fe$

0207

0208  $ed=\sqrt{(A2(j,6)-t\_md)^2+(A2(j,8)-t\_ad)^2}$  //Distancia entre os pontos E e D

0209  $ED(j,l)=ed$

0210

0211 //Calculo da distancia do ponto E até a reta  $S\_ys$ (Ponto G)

0212

0213  $t\_mg=(s\_ys*(s\_ys^2-s\_ys*A2(j,8)+s\_ys*A2(j,6)))/(s\_ys^2+s\_ys^2)$  //Tensão média no ponto G

0214 T\_MG(j,l)=t\_mg

0215

0216 t\_ag=-(s\_ys/s\_ys)\*t\_mg+s\_ys //Tensão alternada no ponto D

0217 T\_AG(j,l)=t\_ag

0218

0219 eg=sqrt((A2(j,6)-t\_mg)^2+(A2(j,8)-t\_ag)^2) //Distancia entre os pontos E e D

0220 EG(j,l)=eg

0221

0222

0223 //Condições para o ponto E pertencer ao envelope

0224

0225 if A2(j,8)<=s\_ys && A2(j,6)<=s\_ys && A2(j,8)<=-(s\_es/s\_us)\*A2(j,6)+s\_es

0226 cond1=%t

0227 else

0228 cond1=%f

0229 end

0230

0231 //Calculo do coeficiente de segurança

0232

0233 if cond1==%f

0234 n\_sfechada=0

0235 n\_sf=0

0236

```
0237 else

0238 if ed>eg //Caso o ponto esteja mais proximo da linha Sys - Sys

0239 n_sf=(fe+eg)/fe //Coeficiente de segurança

0240

0241

0242 else //Caso o ponto esteja mais proximo da linha Sut- Ses

0243 n_sf=(fe+ed)/fe //Coeficiente de segurança

0244

0245 end

0246

0247 n_sfechada=s_ys/A2(j,10)

0248

0249 end

0250 N_SFECHADA(j,1)=n_sfechada //Coeficiente de segurança mola fechada

0251 N_SF(j,1)=n_sf

0252 else

0253 N_SFECHADA(j,1)=0

0254 N_SF(j,1)=0

0255 end

0256

0257 MATERIAL(j,5,1)=N_SF(j,1)

0258 %MATERIAL(j,6,1)=N_SFECHADA(j,1)

0259
```

0260 if N\_SF(j,l)>1

0261 MATFINAL(Z(l),:,l)=MATERIAL(j, :,l)

0262 Z(l)=Z(l)+1

0263 end

0264 end

0265

0266 end

0267

0268 M\_1=MATFINAL(1:(Z(1)-1),:,1);

0269 //M\_2=MATFINAL(1:(Z(2)-1),:,2);

0270 M\_3=MATFINAL(1:(Z(3)-1),:,3);

0271 M\_4=MATFINAL(1:(Z(4)-1),:,4);

0272 M\_5=MATFINAL(1:(Z(5)-1),:,5);

0273

0274 M\_0=['Diâmetro do fio' 'Índice C' 'Nº de Espiras total' 'Passo da Mola' 'Coeficiente de  
Segurança' 'Massa da Mola']

0275

0276 A227=[M\_0;string(M\_1)]

0277 handles.A227.string=A227

0278 A228=[M\_0;string(M\_2)]

0279 handles.A228.string=A228

0280 A229=[M\_0;string(M\_3)]

0281 handles.A229.string=A229

```
0282 A232=[M_0;string(M_4)]
0283 handles.A232.string=A232
0284 A401=[M_0;string(M_5)]
0285 handles.A401.string=A401
0286
0287          plot(M_1(:,2),M_1(:,5),'-*',M_2(:,2),M_2(:,5),'-o',M_3(:,2),M_3(:,5),'-
+',M_4(:,2),M_4(:,5),'-
s',M_5(:,2),M_5(:,5),'-x')
0288 xtitle('Grafico','Indice de Mola','Coeficiente de Segurança');
0289 legend('A227','A228','A229','A323','A401')
0290 xgrid(1)
0291
0292 endfunction
0293
0294 function fechar_callback(handles)
0295 //Write your callback for fechar here
0296
0297 endfunction
0298
0299 function A227_callback(handles)
0354 //Write your callback for A227 here
0355
0001 endfunction
```

0002

0003 function A228\_callback(handles)

0004 //Write your callback for A228 here

0360

0361 endfunction

0001

0002 function A229\_callback(handles)

0003 //Write your callback for A229 here

0004

0366 endfunction

0367

0001 function A232\_callback(handles)

0002 //Write your callback for A232 here

0003

0004 endfunction

0372

0373 function A401\_callback(handles)

0001 //Write your callback for A401 here

0002

0003 endfunction