

PEDRO NUNES DA SILVA

**PROJETO ESTRUTURAL DE MOLAS HELICOIDAIS DE EXTENSÃO
UTILIZANDO O MICROSOFT EXCEL E PROGRAMAÇÃO VBA**

PEDRO NUNES DA SILVA

**PROJETO ESTRUTURAL DE MOLAS HELICOIDAIS DE EXTENSÃO
UTILIZANDO O MICROSOFT EXCEL E PROGRAMAÇÃO VBA**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá - SP
2019

S586p	Silva, Pedro Nunes da Projeto estrutural de molas helicoidais de extensão utilizando o microsoft excel e programação VBA / Pedro Nunes da Silva – Guaratinguetá, 2019. 79 f : il. Bibliografia: f. 60-61 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva 1. Excel – Programa de computador. 2. Molas (Mecanismo). 3. Linguagem de programação (Computadores). I. Título. CDU 62-272
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

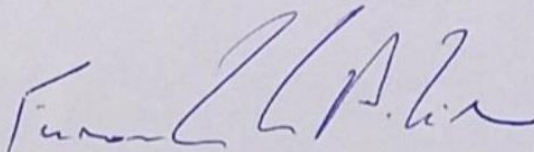
PEDRO NUNES DA SILVA

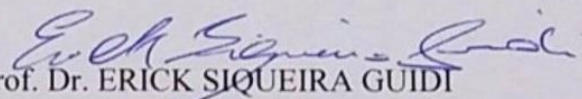
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

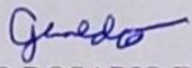
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI
UNESP-FEG


Ms. GERALDO CESAR ROSARIO DE OLIVEIRA
UNESP-FEG

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a meus pais Ivan Nunes da Silva e Laura Regina Garisto da Silva, por todos os esforços para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva*, que foi inspirador em sala de aula, cujos ensinamentos foram base para que este estudo fosse realizado.

A minha namorada Fernanda Maria Luz dos Santos, por todo o carinho, motivação e tudo o mais que estava em seu alcance.

Aos meus irmãos da República Casa do Cai Alho pelas histórias das quais vou me lembrar por toda a vida, em especial ao Gabriel Fazzan Borges, parceiro de todos os momentos.

A minha amiga Sofia Glyniadakis, que me guiou por todo o período acadêmico com sua inteligência e sabedoria.

Aos funcionários e professores da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pelo conhecimento comigo compartilhado.

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho visa realizar as etapas de cálculo de uma mola helicoidal de extensão com atuação de carregamento cíclico, tendo como objetivo a facilitação do seu projeto e especificação. Através do Excel e da linguagem de programação VBA, o usuário irá inserir alguns dados de entrada e, a partir deles, serão calculados os parâmetros envolvidos, sendo exibidos os principais fatores das molas aprovadas, como o comprimento, o diâmetro médio da espira, coeficientes de segurança e alguns gráficos de variação com o índice C. Com isso, o usuário poderá determinar qual será a melhor mola a se utilizar com base nas necessidades do seu projeto, além de obter informações para a fabricação ou compra da mesma.

Para que não haja especificações fora dos padrões de fabricação, alguns dados serão preenchidos pelo usuário, como por exemplo o material e diâmetro de fio correspondente, que são condicionados a normas, com o programa impedindo que sejam inseridos parâmetros distintos dos estabelecidos.

Pelo projeto de molas dessa natureza ser extenso, esta ferramenta computacional se mostra de grande utilidade para qualquer empresa que compre, fabrique ou projete molas de extensão para qualquer que seja a finalidade, pois reduz significativamente o tempo levado para se realizar todas as etapas, além de impedir erros de cálculo.

PALAVRAS-CHAVE: Mola Helicoidal de Extensão. Excel. VBA.

ABSTRACT

This undergraduated thesis aims to perform the steps of calculation of an extension coil spring with cyclic loading actuation, in order to facilitate it's project and specification. Through Excel software and the VBA programming language, the user will input some informations and, from them, the involved parameters will be calculated and the main factors of the approved springs will be displayed, such as the lentgh, the avarage diameter of the coil, safety coefficients and C-index variation charts. In order not to have specifications outside the manufacture standard, some data that the user will fill in, as the material and corresponding diameter of wire, are conditioned to norms, with the program preventing entering parameters other than those established.

Because springs project of this nature is extensive, this computational tool is a great use to any company thay buys it, manufactures it or designs springs for any porpouse, as it significantly reduces the time taken to complete all the steps, plus to prevent miscalculations.

KEYWORDS: Extension Coil Spring. Excel. VBA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Intervalos preferenciais de tensão devido a pré-carga	26
Figura 2 – Intervalo preferencial de tensão devido a pré-carga	27
Figura 3 – Localização do ponto A onde ocorre a máxima tensão de flexão no gancho.....	28
Figura 4 – Localização do ponto B onde ocorre a máxima tensão de torção no gancho	29
Figura 5 – Exemplo de diagrama de Goodman modificado.....	33
Figura 6 – Dimensões de uma mola helicoidal de extensão com ganchos padronizados	35
Figura 7 – Tela inicial do software	37
Figura 8 – Tela de Inputs do usuário	38
Figura 9 – Exemplo do comentário exibido para o usuário.....	38
Figura 10 – Validação de dados realizada no campo do diâmetro de fio	39
Figura 11 – Tela de inputs com lista de valores condicionada	40
Figura 12 – Banco de dados dos diâmetros de fio por material	41
Figura 13 – Exemplo de tabela do banco de dados do software.....	41
Figura 14 – Parte da tabela de cálculos	42
Figura 15 – Parte da tabela de cálculos	42
Figura 16 – Tela de resultados	48
Figura 17 – Mensagem exibida quando há molas aprovadas	48
Figura 18 – Mensagem exibida quando não há molas aprovadas	48
Figura 19 – Exemplo do gráfico de parâmetros operacionais e construtivos.....	50
Figura 20 – Exemplo do gráfico de peso total da mola.....	51
Figura 21 – Exemplo do gráfico dos coeficientes de segurança.....	51
Figura 22 – Tabela de cálculos com variação de C2	52
Figura 23 – Exemplo do gráfico de CS à fadiga do gancho em torção com C2 variando.....	53
Figura 24 – Valores utilizados no estudo de caso.....	54
Figura 25 – Gráfico dos parâmetros operacionais e construtivos do estudo de caso	56
Figura 26 – Gráfico do peso total do estudo de caso.....	56
Figura 27 – Gráfico dos coeficientes de segurança envolvidos no estudo de caso	57
Figura 28 – Gráfico dos coeficientes de segurança envolvidos no estudo de caso	58
Quadro 1 – Outras tensões atuantes na mola.....	31
Quadro 2 – Parâmetros exibidos ao usuário na tela de resultados	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais comuns para fio de mola e respectivas descrições.....	19
Tabela 2 – Diâmetros preferenciais de fio por número ASTM em milímetros	21
Tabela 3 – Valores A e b para determinados materiais de fio de mola	22
Tabela 4 – Valores percentuais para determinar limites de escoamento de torção e flexão	23
Tabela 5 – Parâmetros da tabela de Excel na figura 22	53
Tabela 6 – Comparativa de valores do estudo de caso	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
SAE	Society of Automotive Engineers
SI	Sistema Internacional

LISTA DE SÍMBOLOS

d	diâmetro de fio
D	diâmetro médio de espira
C	índice de mola
τ_i	tensão de cisalhamento inicial da espira
K_s	fator de cisalhamento direto
$\tau_{\min}$	tensão de cisalhamento mínima na espira
$\tau_{\max}$	tensão de cisalhamento máxima na espira
F_i	força de tração inicial
$F_{\max}$	máxima carga variada
$F_{\min}$	mínima carga variada
F_m	força média
F_a	força alternada
τ_{med}	tensão média da espira
K_w	fator de Wahl
τ_a	tensão de cisalhamento alternada
S_{ut}	limite de resistência à tração
S_{us}	limite de resistência ao cisalhamento
S_{ys}	limite de resistência ao escoamento sob torção
S_{ew}	limite de duração do fio de molas não-jateadas
S_{es}	limite de resistência à fadiga em condições não alternadas
N_{fs}	coeficiente de segurança para torção
K_b	fator K para o ganho sob torção
$\sigma_{\min}$	tensão mínima devido à flexão no gancho
σ_m	tensão média devido à flexão no gancho
σ_a	tensão alternada devido à flexão no gancho
S_e	resistência de endurance por tração
N_{fb}	coeficiente de segurança à fadiga para o gancho em flexão
$\tau_{B\min}$	tensão mínima de torção no gancho
τ_{Bm}	tensão média de torção no gancho
τ_{Ba}	tensão alternada de torção no gancho
K	constante da mola
N_a	número de espiras ativas
N_t	número total de espiras
L_b	comprimento do corpo da mola
L_f	comprimento livre da mola
y	deflexão da mola

$Y_{\max}$ deflexão máxima da mola

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	OBJETIVO	16
1.3	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	CONFIGURAÇÃO DA MOLA	18
2.2	PARÂMETROS DA MOLA	18
2.2.1	Diâmetros preferenciais de fio	18
2.2.2	Resistências do fio da mola	21
2.2.2.1	Resistência à tração	21
2.2.2.2	Resistência ao cisalhamento	22
2.2.2.3	Resistência ao escoamento sob torção e flexão	22
2.2.2.4	Limite de duração do fio	23
2.2.2.5	Limite de resistência à fadiga para condições alternadas	23
2.2.2.6	Resistência de endurance por tração	24
2.3	A CONSTANTE C NO PROJETO DE MOLAS DE EXTENSÃO	24
2.3.1	Índice C da mola e seus parâmetros	24
2.4	FORÇAS ATUANTES EM MOLAS DE EXTENSÃO	25
2.4.1	Força inicial de tração da espira	25
2.4.2	Força alternada e média para carregamento cíclico	25
2.5	TENSÕES EXISTENTES EM MOLAS DE EXTENSÃO	25
2.5.1	Tensão inicial de pré-carga	26
2.5.2	Tensão máxima de flexão	27
2.5.3	Tensão máxima de torção	29
2.5.4	Outras tensões atuantes	30
2.6	FATORES ADIMENSIONAIS DE TENSÃO	32
2.6.1	Fator de cisalhamento direto	32
2.6.2	Fator de Wahl	32
2.7	COEFICIENTES DE SEGURANÇA	32
2.7.1	Coeficiente de segurança para espiras em torção	32
2.7.2	Coeficientes de segurança para os ganchos	33

2.8	CONSTRUTIVO	33
2.8.1	A constante elástica	33
2.8.2	Espiras ativas	34
2.8.3	Número total de espiras.....	34
2.8.4	Dimensões características	34
2.8.4.1	Diâmetros.....	34
2.8.4.2	Comprimentos.....	35
2.8.5	Peso total.....	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	DADOS INSERIDOS PELO USUÁRIO.....	37
3.1.1	Tela inicial.....	37
3.1.2	Tela de inserção de dados	37
3.2	BANCO DE DADOS	40
3.3	TABELA DE CÁLCULOS.....	41
3.4	TELA DE RESULTADOS.....	45
3.4.1	Programação VBA	49
3.4.2	Gráficos.....	50
4	RESULTADOS	54
4.1	ESTUDO DE CASO	54
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	60
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	61
	APÊNDICE A – Linhas de código do Excel utilizadas no programa	62
	APÊNDICE B – Linhas de código VBA utilizadas no programa	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As molas helicoidais de extensão são importantes elementos de máquinas, estudados ao longo do curso de engenharia mecânica. São componentes muito utilizados na indústria em geral, devido à sua multifuncionalidade.

Um engenheiro deve ser capaz de dimensionar uma mola para determinada aplicação, através dos conhecimentos obtidos durante a graduação, na qual desenvolvemos o aprendizado neste elemento de máquina utilizando o livro-texto Norton, que também é a base de onde foram tiradas as fórmulas, tabelas e imagens do trabalho.

Uma mola helicoidal de extensão [...] provê força de tração e admite grandes deflexões. [...] O gancho possui tensões maiores que as espiras e normalmente falha primeiro. (NORTON, 2013, ed. 4, p. 788)

A ferramenta Excel, aliada à linguagem Visual Basic for Applications (VBA) é capaz de realizar cálculos e determinações lógicas, as quais podem ser utilizadas para determinar os parâmetros necessários para diferentes tipos de projeto. Para o caso deste trabalho, a ferramenta auxilia na seleção das molas helicoidais de tração aprovadas, a partir de variáveis de entrada inseridas pelo usuário.

1.2 OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo desenvolver um programa em Excel/VBA para projetar uma mola helicoidal de extensão atuando sobre carga de fadiga, onde a partir de dados de entrada inseridos pelo usuário, serão especificadas diversas molas e exibidas para o utente, que poderá selecionar a melhor opção para a utilidade que lhe é de interesse.

A finalidade deste trabalho é facilitar o processo de cálculo e seleção de uma mola helicoidal de extensão solicitada em fadiga, evitando que erros sejam cometidos através do cerceamento dos dados de entrada realizados pelo usuário e a automatização dos cálculos, podendo ser utilizada por fabricantes, estudantes ou até mesmo entusiastas do assunto. O usuário não terá acesso às etapas de cálculo, recebendo apenas as molas aprovadas, seus gráficos e parâmetros de relevância para especificação e fabricação.

1.3 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Durante o curso de engenharia mecânica, é apresentado o processo de cálculo de diversos elementos de máquina. Tendo como ponto comum a alta quantidade de etapas para obter as respostas requeridas, é inerente que ocorram erros que acabam por prejudicar todo o restante do trabalho, muitas vezes só sendo possível os identificar ao encontrar o valor final procurado, ou até mesmo não interpretar que o resultado é inadequado. Com isso, a motivação deste trabalho vem da necessidade de facilitação deste processo e todas as suas possíveis aplicações, tanto no ramo acadêmico como no industrial.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho consiste em cinco capítulos, sendo este o primeiro, onde são abordados os objetivos e motivações, além de uma breve introdução ao escopo do que é elaborado.

No capítulo 2, é abordada a fundamentação teórica completa para este trabalho, sendo demonstrado todo o equacionamento necessário para a execução do projeto, além de gráficos e materiais de apoio para um completo entendimento do projeto em si, aprofundando conceitualmente o projeto de molas helicoidais de extensão solicitadas à fadiga.

A partir do terceiro capítulo, onde são discutidos os métodos do trabalho, o programa desenvolvido para a execução dos projetos de molas é abordado, sendo demonstradas todas as fórmulas de Excel, a programação VBA, interface com o usuário, tela de resultados e gráficos.

O capítulo 4, por sua vez, aborda os resultados baseados em um estudo de caso. Aqui, são comparados valores entre o processo manual de cálculo e o mesmo processo, utilizando o programa. Após a listagem dos resultados, estes são analisados e discutidos, sendo inclusive comparado o tempo de execução dos projetos nas duas diferentes abordagens utilizadas.

Já o capítulo 5 traz a conclusão, onde é definido se o trabalho atingiu seus objetivos, além de abordar conclusões obtidas durante a execução deste, e também traz sugestões de melhorias para futuros trabalhos a serem desenvolvidos nesta área.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONFIGURAÇÃO DA MOLA

Para este trabalho, é utilizada uma mola helicoidal de extensão solicitada em fadiga, com as extremidades sendo ganchos padronizados. O índice de mola será variável e a constante inicial da mola será constante. A seção transversal da mola é circular e o diâmetro de fio é um fixo selecionado pelo usuário, baseado no material que também é escolhido, ambos baseados na norma ASTM.

A partir dos inputs do usuário, os outros parâmetros da mola serão estabelecidos, variáveis com o índice da mola que vai de 3 a 16, possibilitando um total de 27 especificações.

2.2 PARÂMETROS DA MOLA

Para este projeto, serão considerados os materiais preferenciais para molas, conforme norma ASTM, e será verificado o desempenho para carregamentos alternados. Parâmetros como diâmetros preferenciais de fio, que interferem em toda a base de cálculos do projeto, são condicionados a partir da seleção do material da mola.

2.2.1 Diâmetros preferenciais de fio

Na indústria, as normas técnicas tem a finalidade de, através de consenso e aprovação por órgão reconhecido, atingir o grau ótimo ordenado no contexto inserido, trazendo padronizações baseadas em resultados, tecnologias e experiências consolidadas que permitem otimizações em prol da comunidade. Para este trabalho, os parâmetros da mola serão baseados nas normas da ASTM.

As normas determinam os materiais comuns para as molas e seus respectivos diâmetros preferenciais de fio, porém diâmetros fora dos indicados podem ser utilizados. No entanto, para este trabalho se usará apenas os valores tabelados conforme norma ASTM, por possibilitar seleções otimizadas com diferentes configurações. Mais informações sobre os materiais de fios de mola são encontradas na Tabela 1. Já os diâmetros preferenciais de fio por material, são exibidos na Tabela 2.

Tabela 1 – Materiais comuns para fio de mola e respectivas descrições.

Nº ASTM	Material	Nº SAE	Descrição
A227	Fio repuxado a frio (encruado)	1066	Fio de mola mais barato e de uso mais geral. Adequado para carregamento, porém inadequado para carga de fadiga ou impacto. O intervalo de temperaturas vai de 0° a 120°C (250°F).
A228	Fio musical	1085	Material mais tenaz de uso mais generalizado para molas de pequenas espiras. Resistência mais alta de tração e fadiga de todos os fios musicais. Intervalo de temperaturas de 0 a 120°C (250°F).
A229	Fio revenido em óleo	1065	Aço de uso geral para molas. Menos custoso e disponível em tamanhos maiores que os fios musicais. Adequados para carga estática, mas inadequados para carga de fadiga ou impacto. Intervalo de temperatura de 0°C a 180°C (350°F).
A230	Fio revenido em óleo	1070	Qualidade de mola para válvula – adequado para carga de fadiga.
A232	Cromo vanádio	6150	Liga mais popular de aço para mola. Qualidade de mola para válvula – adequada para carga de fadiga. Também boa para cargas de choque e impacto. Para temperaturas até 220°C (425°F). Disponível na forma recozido e pré-revenido.
A313(302)	Aço inoxidável	30302	Adequado para aplicações de fadiga.
Continua	Na próx.	página	-----

A401	Cromo de silício	9254	Qualidade de mola de válvula – adequado para carga de fadiga. Segunda resistência mais alta para fio musical e tem resistência mais elevada à temperatura máxima de até 220°C (425°F).
B134, 260	Latão de mola	CA-260	Baixa resistência – boa resistência à corrosão
B159	Fósforo bronze	CA-510	Resistência mais alta que a do latão – melhor resistência à fadiga – boa resistência à corrosão. Não pode ser tratado termicamente ou dobrado ao longo dos grãos.
B197	Berílio Cobre	CA-172	Resistência maior que a do latão – melhor resistência à fadiga – boa resistência à corrosão. Pode ser tratado termicamente ou dobrado ao longo dos grãos.
-	Inconel X-750	-	Resistência à corrosão.

Fonte: Transcrição do autor de tabela do Norton. (2013)

Tabela 2 – Diâmetros preferenciais de fio por número ASTM em milímetros.

A227	A228	A229	A232	A401
0,70	0,10	0,50	0,80	1,60
0,80	0,12	0,55	0,90	1,80
0,90	0,16	0,60	1,00	2,00
1,00	0,20	0,65	1,10	2,20
1,10	0,25	0,70	1,20	2,50
1,20	0,30	0,80	1,40	2,80
1,40	0,35	0,90	1,60	3,00
1,60	0,40	1,00	1,80	3,50
1,80	0,45	1,10	2,00	4,00
2,00	0,50	1,20	2,20	4,50
2,20	0,55	1,40	2,50	5,00
2,50	0,60	1,60	2,80	5,50
2,80	0,65	1,80	3,00	6,00
3,00	0,70	2,00	3,50	6,50
3,50	0,80	2,20	4,00	7,00
4,00	0,90	2,50	4,50	8,00
4,50	1,00	2,80	5,00	9,00
5,00	1,10	3,00	5,50	-
5,50	1,20	3,50	6,00	-
6,00	1,40	4,00	6,50	-
6,50	1,60	4,50	7,00	-
7,00	1,80	5,00	8,00	-
8,00	2,00	5,50	9,00	-
9,00	2,20	6,00	10,00	-
10,00	2,50	6,50	11,00	-
11,00	2,80	7,00	-	-
12,00	3,00	8,00	-	-
13,00	3,50	9,00	-	-
14,00	4,00	10,00	-	-
15,00	4,50	11,00	-	-
16,00	5,00	12,00	-	-

Fonte: Transcrição do autor de tabela do Norton. (2013)

2.2.2 Resistências do fio da mola

2.2.2.1 Resistência à tração

Segundo Norton (2013), os dados dos materiais para fio de mola abordados neste trabalho podem ser descritos, de maneira aproximada, através da equação:

$$S_{ut} \cong Ad^b \quad (1)$$

Trata-se de uma função exponencial que se utiliza de valores tabelados para A e b, conforme descritos na Tabela 3 que está de acordo com a norma ASTM, para cada material de fio de mola disponível. O diâmetro do fio é expresso em milímetros.

Tabela 3 – Valores A e b para determinados materiais de fio de mola.

Nº ASTM	Material	Expoente b	Coefficiente A [MPa]
A227	Repuxado a frio	-0,1822	1753,3
A228	Fio musical	-0,1625	2153,5
A229	Revenido em óleo	-0,1833	1831,2
A232	Cromo-v	-0,1453	1909,9
A401	Cromo-s	-0,0934	2059,2

Fonte: Transcrição do autor de tabela do Norton. (2013)

2.2.2.2 Resistência ao cisalhamento

Segundo Norton (2013), o limite de resistência ao cisalhamento pode ser descrito da seguinte forma:

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

Tal aproximação é baseada em testes abrangentes, que definiu o limite de resistência ao cisalhamento como 67% do limite de resistência à tração do material do fio da mola.

2.2.2.3 Resistência ao escoamento sob torção e flexão

De acordo com Norton (2013), o limite de resistência ao escoamento sob torção e flexão varia conforme o material da mola e seus valores são determinados como porcentagens da tensão última a tração, conforme mostrado na Tabela 4:

Tabela 4 – Valores percentuais para determinar limites de escoamento de torção e flexão.

Nº ASTM	S_{ys} em torção – Corpo	S_{ys} em torção - Extremidade	S_y em torção - Extremidade
A227, A228	45%	40%	75%
A229, A230, A232, A401	50%	40%	75%
A313, B134, B159, B197	35%	30%	55%

Fonte: Transcrição do autor de tabela do Norton. (2013)

2.2.2.4 Limite de duração do fio

Para Zimmerli (NORTON, 2013, p. 804)¹, o limite de duração do fio para molas com diâmetro de fio inferiores a 10 mm, independente da liga que o constitui e para vida infinita, foi definido como:

$$S_{ew} \cong 45,0 \text{ kpsi (310 Mpa) para molas não jateadas} \quad (3)$$

$$S_{ew} \cong 67,5 \text{ kpsi (465 Mpa) para molas jateadas}$$

Tais valores foram confirmados em pesquisa e não necessitam de parâmetros de correção, pois os dados de teste foram obtidos sob condições reais.

Para este trabalho, será considerada apenas a condição de molas não jateadas, que é o recomendado para molas de extensão.

2.2.2.5 Limite de resistência à fadiga para condições alternadas

De acordo com Norton (2013), o limite de resistência à fadiga para condições alternadas correlaciona os valores de limite de duração do fio e o limite de resistência ao cisalhamento, para que o último contemple uma condição de carregamento alternado:

$$S_{es} = 0,5 \frac{S_{ew} S_{us}}{S_{us} - 0,5 S_{ew}} \quad (4)$$

¹ ZIMMERLI, F. P. **Human failures in spring design**. The mainspring, associated spring corp., Aug.-Sept. 1957.
NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

2.2.2.6 Resistência de endurance por tração

Norton (2013) diz que, para os ganchos, é necessário obter a resistência de endurance por tração a partir da resistência de endurance torcional:

$$S_e = \frac{S_{es}}{0,67} \quad (5)$$

2.3 A CONSTANTE C NO PROJETO DE MOLAS DE EXTENSÃO

O principal parâmetro para o projeto de molas é o índice C. A partir dele, é possível determinar todos os outros valores operacionais, construtivos e complementares para o projeto da mola. Para este trabalho, os cálculos serão realizados para o seguinte intervalo:

$$3,0 \leq C \leq 16,0 \quad (6)$$

Para o usuário, apenas os valores de C que forem aprovados e seus principais parâmetros construtivos serão exibidos, porém serão também mostrados gráficos de apoio com as informações dos projetos aprovados e reprovados.

2.3.1 Índice C da mola e seus parâmetros

Segundo Shigley (2011), o índice C da mola é definido como a razão entre o diâmetro médio da espira D e o diâmetro do fio d.

$$C = \frac{D}{d} \quad (7)$$

Para este trabalho, após definido os valores de C e d, calcula-se D.

2.4 FORÇAS ATUANTES EM MOLAS DE EXTENSÃO

2.4.1 Força inicial de tração da espira

De acordo com Norton (2013), a força inicial de tração na espira (F_i) é a força de pré-carga que ocorre no enrolamento das espiras. Esta força deve ser superada para que aja deflexão da mola, de modo que $F_{min} > F_i$. Portanto, neste ponto tem-se o primeiro parâmetro para ser avaliado no projeto, sendo reprovado caso $F_{min} < F_i$, sendo F_{min} a mínima força na aplicação verificada.

2.4.2 Força alternada e média para carregamento cíclico

Com os inputs dados pelo usuário para os valores de força máxima (F_{max}) e força mínima (F_{min}), é possível obter a força média (F_m) e a força alternada (F_a), que ocorrem pelo carregamento cíclico considerado neste trabalho. Tais forças são essenciais para determinar as tensões de projeto das espiras e extremidades da mola, e assim verificar para quais diâmetros médios D de espira satisfazem o carregamento em avaliação. As equações para determinar as forças foram retiradas do Norton (2013) e do Shigley (2011).

A força média é:

$$F_m = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} \quad (8)$$

Enquanto a força alternada é dada por:

$$F_a = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \quad (9)$$

2.5 TENSÕES EXISTENTES EM MOLAS DE EXTENSÃO

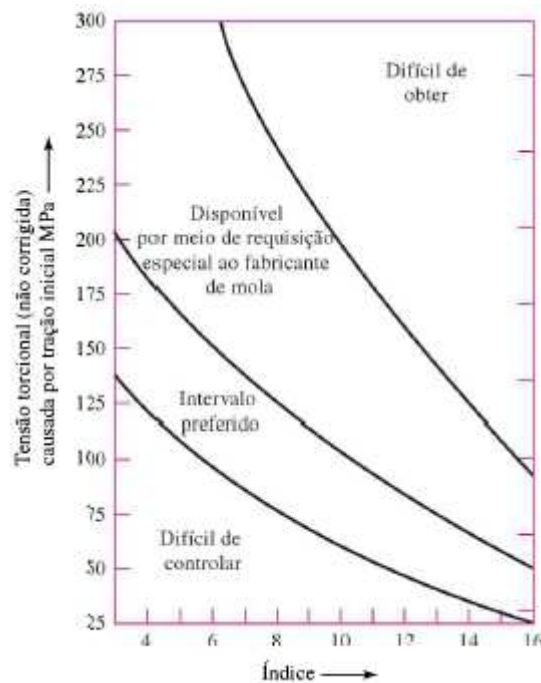
De acordo com Shigley (2011), nas molas de extensão, existe uma componente de tensão na seção transversal da espira devido a torção e uma devido a força cortante. Além

disso, existem também as tensões máximas atuantes nos ganchos padronizados e a tensão inicial que ocorre durante a fabricação.

2.5.1 Tensão inicial de pré-carga

Shigley (2011) cita que a tração inicial é necessária para que se mantenha o comprimento livre da mola. A figura 1 demonstra os intervalos de tensão torcional ocasionada por tração inicial para diferentes índices de mola.

Figura 1 – Intervalos preferenciais de tensão devido a pré-carga.



Fonte: Shigley (2011)

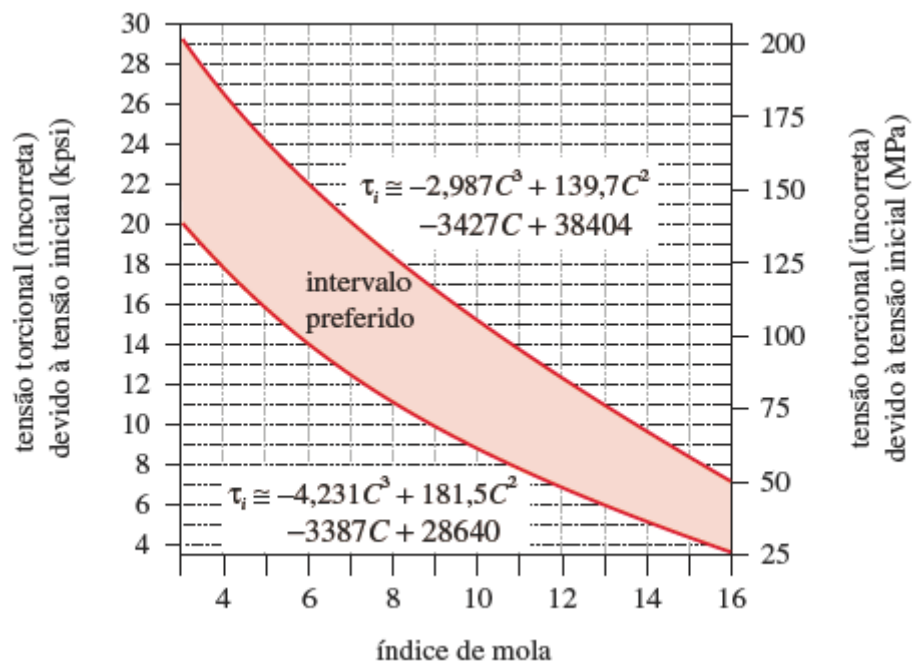
De acordo com Norton (2013), a tensão inicial de pré-carga ocorre devido à fabricação da mola. A força inicial (F_i) pode ser controlada no processo de fabricação, possibilitando assim a determinação das tensões iniciais. Existe um intervalo preferencial para a tensão inicial, pois este intervalo permite mais facilidade para fabricação da mola. O intervalo é composto por duas funções, uma inferior e outra superior que variam com o índice C , como mostrado a seguir:

$$\tau_i \cong -4,231C^3 + 181,5C^2 - 3387C + 28640 \quad (10)$$

$$\tau_i \cong -2,987C^3 + 139,7C^2 - 3427C + 38404 \quad (11)$$

Ambas as funções expressam o resultado em psi. A figura 2 mostra a abordagem do Norton (2013) para o gráfico de intervalo preferido da tensão torcional ocasionada pela tensão inicial.

Figura 2 – Intervalo preferencial de tensão devido a pré-carga.



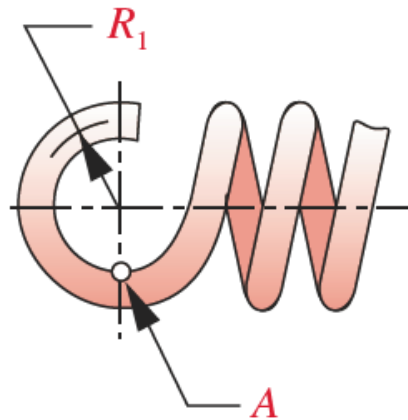
Fonte: Norton (2013)

2.5.2 Tensão máxima de flexão

Segundo Shigley (2011), o que difere as molas de tração das molas de extensão, é a existência de um meio que transfira a carga para as espiras da mola, que são as extremidades.

De acordo com Norton (2013), a tensão máxima devido a flexão ocorre no gancho ou laço devido ao carregamento como uma viga curva. A figura 3 mostra o ponto onde ocorre esta tensão, chamado de ponto A.

Figura 3 – Localização do ponto A onde ocorre a máxima tensão de flexão no gancho ou laço.



Fonte: Norton (2013)

Para determinar o valor da tensão de flexão no ponto A, utiliza-se a seguinte equação:

$$\sigma_A = K_b \frac{16DF}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad (12)$$

Sendo K_b um fator adimensional de concentração de tensão em um fio curvo dado por Wahl, e pode ser encontrado da seguinte forma:

$$K_b = \frac{4C_1^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 - 1)} \quad (13)$$

Com

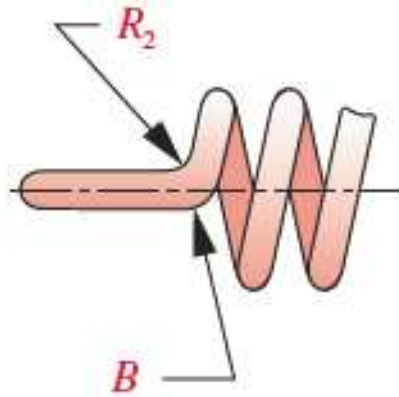
$$C_1 = \frac{2R_1}{d} \quad (14)$$

Para R_1 igual ao raio médio da espira.

2.5.3 Tensão máxima de torção

A tensão máxima de torção ocorre em um ponto onde o raio de flexão é mínimo, como diz Norton (2013) e mostrado na figura 4.

Figura 4 – Localização do ponto B onde ocorre a máxima tensão de torção no gancho ou laço.



Fonte: Norton (2013)

A tensão máxima de torção no ponto B é determinada por:

$$\tau_B = K_{w2} \frac{8DF}{\pi d^3} \quad (15)$$

Onde K_{w2} é o fator de Wahl que é encontrado pela equação:

$$K_{w2} = \frac{4C_2 - 1}{4C_2 - 4} \quad (16)$$

É recomendação de projeto que:

$$4 \leq C_2 \leq 12 \quad (17)$$

Com C_2 sendo igual a:

$$C_2 = \frac{2R_2}{d} \quad (18)$$

E R_2 o raio do lado flexionado.

Os cálculos e avaliações destas tensões são determinantes para o projeto de molas helicoidais de extensão. Para este tipo de elemento de máquina, costuma-se falhar com mais frequência os ganchos ou laços, justamente pelas tensões máximas de flexão e torção nestes pontos.

2.5.4 Outras tensões atuantes

Segundo Norton (2013), para determinar os coeficientes de segurança, é necessário que aja uma abrangência de todas as tensões que atuarão no corpo da mola e em suas extremidades. Com isso, além das descritas anteriormente, também devem ser calculadas tensões para diversas cargas que podem ocorrer durante a atuação do elemento de máquina. O quadro 1 a seguir demonstra algumas destas tensões.

Quadro 1 – Outras tensões atuantes na mola.

<i>Tensão</i>	<i>Descrição</i>
<i>Tensão de Cisalhamento Média (τ_m)</i>	<i>A tensão de cisalhamento média é calculada a partir da força média, que é a média aritmética entre a força máxima e mínima. Essa tensão compõe o cálculo do coeficiente de segurança para as espiras avaliadas em torção.</i>
<i>Tensão de Cisalhamento Alternada (τ_a)</i>	<i>A tensão de cisalhamento alternada é calculada a partir da força alternada, que é metade da diferença entre a força máxima e mínima. Essa tensão compõe o cálculo do coeficiente de segurança para as espiras avaliadas em torção.</i>
<i>Tensão de Cisalhamento Mínima (τ_{min})</i>	<i>A tensão de cisalhamento mínima é calculada a partir da força mínima de projeto. Essa tensão compõe o cálculo do coeficiente de segurança para as espiras avaliadas em torção.</i>
<i>Tensão Normal Média na Flexão para as extremidades (σ_m)</i>	<i>A tensão normal média na flexão para as extremidades é calculada a partir da força média. Essa tensão compõe o cálculo do coeficiente de segurança para as extremidades avaliadas em flexão.</i>
<i>Tensão Normal Mínima na Flexão para as extremidades (σ_{min})</i>	<i>A tensão normal mínima na flexão para as extremidades é calculada a partir da força mínima de projeto. Essa tensão compõe o cálculo do coeficiente de segurança para as extremidades avaliadas em flexão.</i>
<i>Tensão de Torção Média Para as Extremidades (τ_{Bm})</i>	<i>A tensão de cisalhamento média nas extremidades é calculada a partir da força média, que é a média aritmética entre a força máxima e mínima. Essa tensão compõe o cálculo do coeficiente de segurança para as extremidades avaliadas em torção.</i>
<i>Tensão de Torção Mínima Para as Extremidades (τ_{Bmin})</i>	<i>A tensão de cisalhamento mínima é calculada a partir da força mínima de projeto. Essa tensão compõe o cálculo do coeficiente de segurança para as extremidades avaliadas em torção.</i>

Fonte: adaptado de Norton (2013)

2.6 FATORES ADIMENSIONAIS DE TENSÃO

Os fatores adimensionais são resultados de manipulações nas equações de tensão, de forma a possibilitar a determinação destes fatores através apenas do índice C da mola e constantes numéricas definidas.

2.6.1 Fator de cisalhamento direto

De acordo com Norton (2013), o fator de cisalhamento direto K_s não leva em consideração a curvatura do fio. Ou seja, o fator K_s é uma correspondência exata à aplicação da força cortante e do torque em um fio reto, sendo:

$$K_s = \left(1 + \frac{0,5}{C}\right) \quad (19)$$

2.6.2 Fator de Wahl

Segundo Norton (2013), o fator de Wahl K_w determina um valor levando em consideração as tensões devido a curvatura das espiras, além das tensões de cisalhamento.

$$K_w = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0,615}{C} \quad (20)$$

2.7 COEFICIENTES DE SEGURANÇA

Para este trabalho, o elemento de máquina tratado é avaliado em três fatores de segurança: em torção para as espiras, e em flexão e torção para os ganchos, já que são onde se encontram os pontos de tensões máximas na mola. Para considerar o projeto como aprovado, todos os três coeficientes de segurança, que são adimensionais, devem ser maiores que 1.

É importante salientar que para este trabalho, foi considerado vida infinita para todos os casos de projeto.

2.7.1 Coeficiente de segurança para espiras em torção

Segundo Norton (2013), o coeficiente de segurança para espiras em torção (N_{fs}) determina a capacidade das espiras de resistir às solicitações que geram tensões de cisalhamento, avaliadas juntamente com os limites de resistência envolvidos.

$$N_{fs} = \frac{S_{es}(S_{us} - \tau_{\min})}{S_{es}(\tau_m - \tau_{\min}) + S_{us}\tau_a} \quad (21)$$

2.7.2 Coeficientes de segurança para os ganchos

Como dito anteriormente, os ganchos possuem os pontos máximos de tensão. Para as molas de extensão, as extremidades tendem a falhar antes das espiras. Com isso, é necessário que se avalie os ganchos em flexão e torção.

Para flexão, de acordo com Norton (2013):

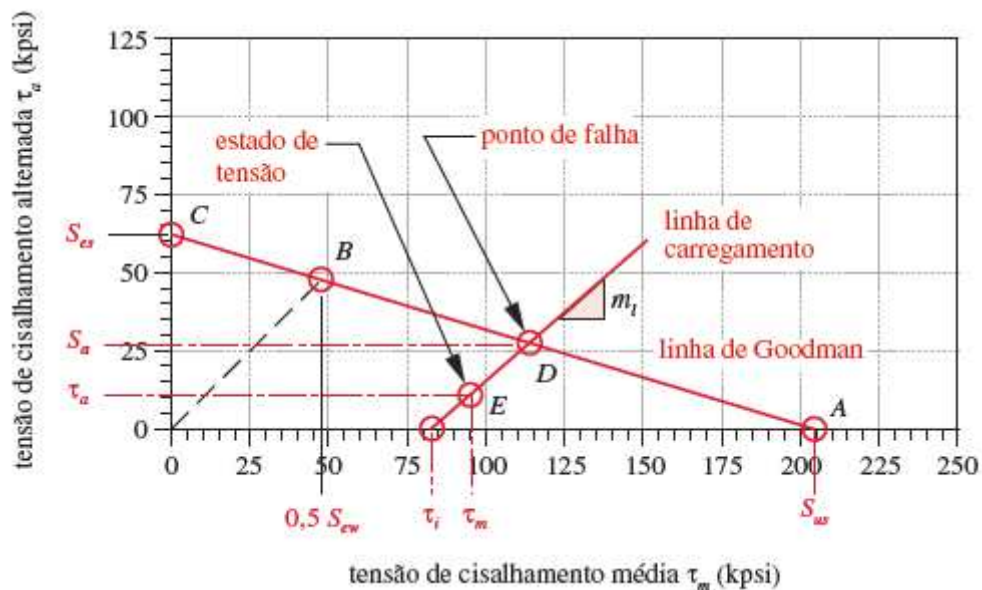
$$N_{fb} = \frac{S_e (S_{ut} - \sigma_{\min})}{S_e (\sigma_{m\acute{e}dia} - \sigma_{\min}) + S_{ut} \sigma_{alt}} \quad (22)$$

Para torção conforme Norton (2013):

$$N_{fs} = \frac{S_{es} (S_{us} - \tau_{\min})}{S_{es} (\tau_m - \tau_{\min}) + S_{us} \tau_a} \quad (23)$$

Como dito por Norton (2013), os coeficientes de segurança, assim como os limites de resistência e as tensões atuantes, são obtidos a partir do diagrama de Goodman modificado. Neste diagrama, é mostrado a linha de carga e é possível determinar todos os pontos de interesse à partir dela. A figura 5 é um exemplo do diagrama de Goodman modificado.

Figura 5 – Exemplo de diagrama de Goodman modificado.



Fonte: Norton(2013)

2.8 CONSTRUTIVO

2.8.1 A constante elástica

De acordo com Norton (2013), a constante de mola (k) é definida como a rigidez da mola. Para este trabalho, todas as molas que serão exibidas ao usuário possuem a mesma constante, que pode ser calculada pela diferença entre as forças máxima e mínima dividida pela deflexão dinâmica da mola, dada em milímetros. Todos estes valores para o cálculo de k serão inputs no projeto.

$$k = \frac{\Delta F}{y} \quad (24)$$

2.8.2 Espiras ativas

Norton (2013) descreve que as espiras ativas da mola (N_a) é o número total de espiras que compoem a mola, e pode ser determinada da seguinte forma:

$$N_a = \frac{d^4 G}{8 D^3 k} \quad (25)$$

Como o valor de N_a deve ser algo capaz de ser fabricável, deve-se arredondar o valor obtido para a quantidade de espiras normalizadas mais próxima. Com o valor de espiras ativas real, é possível obter o valor real ou aferido de k .

2.8.3 Número total de espiras

Segundo Norton (2013), geralmente uma espira é adicionada ao número de espiras ativas para obter um corpo de comprimento L_b , portanto:

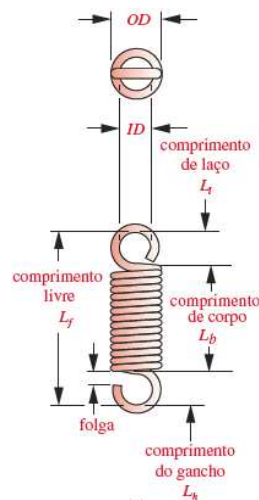
$$N_t = N_a + 1 \quad (26)$$

2.8.4 Dimensões características

2.8.4.1 Diâmetros

Além do diâmetro de fio e médio da espira, existem também dois comprimentos essenciais para a construção e verificação da mola: o diâmetro externo (D_e/OD) e o diâmetro interno (D_i/ID). Na figura 6 é possível verificar ambos os diâmetros, e também que para o tipo de extremidade de ganchos padronizados, o diâmetro do gancho é igual ao diâmetro externo da espira.

Figura 6 – Principais dimensões de uma mola helicoidal de extensão com ganchos padronizados



Fonte: Norton(2013)

De acordo com Shigley (2011), o diâmetro externo é dado por:

$$D_e = D + d \quad (27)$$

Segundo Shigley (2011), o diâmetro interno é:

$$D_i = D_e - 2d \quad (28)$$

2.8.4.2 Comprimentos

Segundo Norton (2013), os principais comprimentos de mola são o comprimento livre (L_f) e o comprimento de corpo (L_b). O primeiro é o comprimento quando não há cargas aplicadas no elemento, como mostrado na figura 6. Já o segundo, é o comprimento das espiras.

O comprimento do corpo é definido por:

$$L_b = N_t d \quad (29)$$

O comprimento livre é:

$$L_f = L_b + 2L_{gancho} \quad (30)$$

Sendo o comprimento do gancho igual ao diâmetro interno da espira.

2.8.5 Peso total

O peso total é um fator determinante para qualquer projeto. Em uma aeronave, por exemplo, mais peso significa mais consumo de combustível, portanto é determinante que se tenha a informação do peso de todos os componentes envolvidos.

De acordo com Shigley (2011), o peso total (W_t) pode ser calculado da seguinte forma:

$$W_t = \frac{\pi^2 d^2 D N_t \gamma}{4} \quad (31)$$

Com isso, todos os fatores presentes no projeto deste trabalho estão demonstrados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Loureiro (2007), a aplicação VBA é um subconjunto do Visual Basic, para atuar juntamente com as aplicações do Microsoft Office. O Visual Basic ou VB, de acordo com Dreux (2009), utiliza como base a linguagem BASIC, uma linguagem de programação com orientação a objetos.

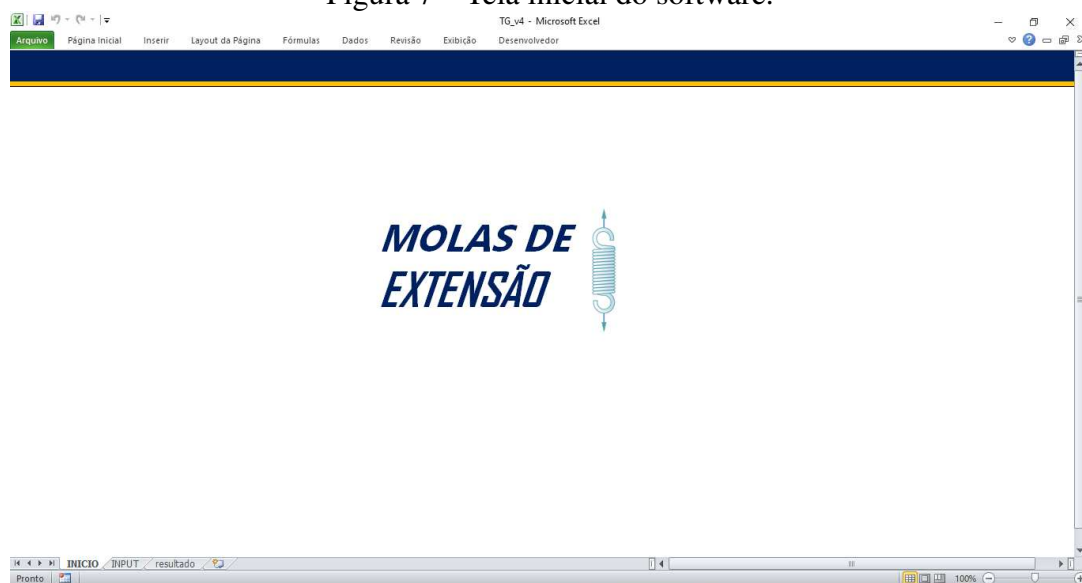
Para este trabalho, foi utilizado o Microsoft Excel juntamente com programação VBA. A escolha por este software foi baseada em alguns fatores como a facilidade da interface para o usuário e a disponibilidade na maioria dos computadores. É o software de cálculo e planilhas mais utilizado do mundo, além de não exigir configurações específicas do computador para o seu bom funcionamento. Como o trabalho visa atender o público profissional, estudantes e até mesmo entusiastas do assunto, a acessibilidade é essencial para sua finalidade.

3.1 DADOS INSERIDOS PELO USUÁRIO

3.1.1 Tela inicial

Ao iniciar o programa, a primeira tela mostrada ao usuário é a tela inicial, conforme mostra a figura 7:

Figura 7 – Tela inicial do software.



Fonte: autor

Para iniciar o programa, o usuário pode clicar no logo, ou selecionar a aba “INPUT”, no canto inferior esquerdo da tela.

3.1.2 Tela de inserção de dados

O projeto visa facilitar o projeto de molas para diferentes aplicações. Portanto, a interface do usuário foi pensada para facilitar a especificação com a menor quantidade de inputs possíveis, além de utilizar o sistema métrico, mais familiar ao público brasileiro e para a maioria das nacionalidades.

Os campos que serão preenchidos pelo usuário são: força mínima(F_{min}), em Newtons, força máxima(F_{max}), também em Newtons, as extremidades, o material da mola, o diâmetro

do fio(d), em milímetros, o índice C do gancho e a deflexão da mola(y), também em milímetros.

Na tela de inserção dos dados, mostrada na figura 8, ao posicionar o cursor sobre os campos há uma breve explicação do que ele representa, assim como mostra a figura 9, sanando assim dúvidas que o usuário venha a ter durante o preenchimento dos espaços.

Figura 8 – Tela de Inputs do usuário.

The screenshot shows a software interface titled "INPUTS" in a dark blue header. Below the header, there are several input fields arranged in a list. Each field has a label on the left, a text box in the middle, and a unit on the right. The inputs are: "Força Mínima (Fmin):" with value "222,4" and unit "N"; "Força Máxima (Fmax):" with value "378,1" and unit "N"; "Tipos de Extremidades:" with value "Ganchos padronizados"; "Material da Mola:" with value "Fio_musical"; "Diâmetro inicial de fio (d):" with value "5,00" and unit "mm"; "Índice C do gancho (C2):" with value "4"; and "Deflexão dinâmica da mola(y):" with value "12,7" and unit "mm". At the bottom of the input area is a large, light gray button labeled "Execução".

Força Mínima (Fmin):	222,4	N
Força Máxima (Fmax):	378,1	N
Tipos de Extremidades:	Ganchos padronizados	
Material da Mola:	Fio_musical	
Diâmetro inicial de fio (d):	5,00	mm
Índice C do gancho (C2):	4	
Deflexão dinâmica da mola(y):	12,7	mm

Execução

Fonte: autor

Figura 9 – Exemplo do comentário exibido para o usuário.

This screenshot is identical to Figure 8, but it includes a tooltip box on the right side. The tooltip is titled "Índices C do gancho da mola. O índice C é um parâmetro adimensional, que afeta diretamente na construção do elemento. Para o gancho, é recomendado: $4 \leq C \leq 12$." An arrow points from the tooltip to the input field for "Índice C do gancho (C2)".

Força Mínima (Fmin):	222,4	N
Força Máxima (Fmax):	378,1	N
Tipos de Extremidades:	Ganchos padronizados	
Material da Mola:	Fio_musical	
Diâmetro inicial de fio (d):	5,00	mm
Índice C do gancho (C2):	4	
Deflexão dinâmica da mola(y):	12,7	mm

Execução

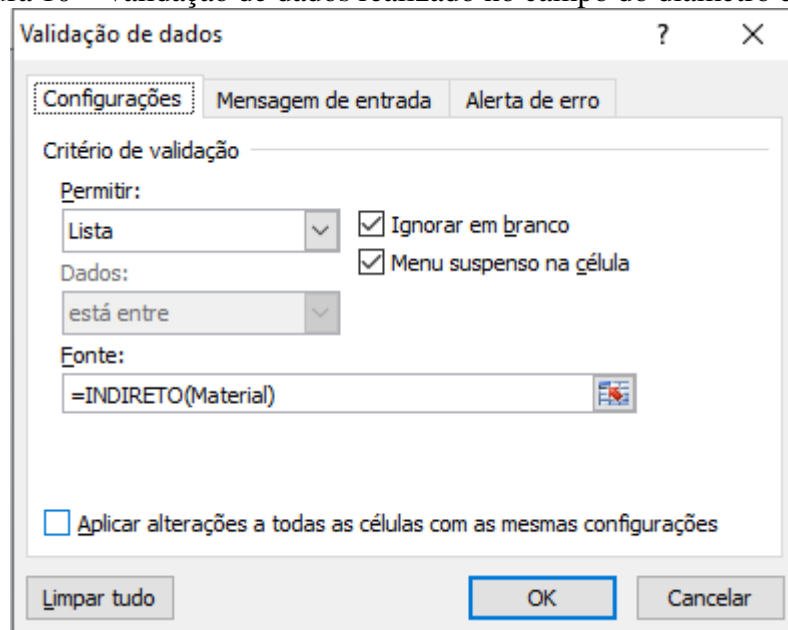
Índices C do gancho da mola. O índice C é um parâmetro adimensional, que afeta diretamente na construção do elemento. Para o gancho, é recomendado: $4 \leq C \leq 12$.

Fonte: autor

Além disso, campos como o material da mola e o diâmetro de fio que é condicionado ao material, possuem listas de valores que permitem as seleções apenas do que é recomendado em norma. Para isso, foi utilizada uma validação de dados na célula onde deve ser inserido o diâmetro de fio, juntamente com a função “INDIRETO” do Excel, que torna um valor condicionado a outro, ou como dito na própria descrição da função no Excel: “retorna uma referência indicada por um valor de texto”. Esta função deve ser inserida dentro da validação de dados para que possibilite a criação de uma lista com os valores recomendados, onde o usuário pode visualizar estes valores e selecionar o que desejar. Como no banco de dados há uma tabela com os materiais listados e outra com os diâmetros preferenciais de fio listados para cada material, após o usuário selecionar qual o material desejado para o projeto da mola, a função indireto busca os diâmetros de fio correspondentes.

A validação de dados se encontra dentro da aba “Dados” do Excel. A janela que se abre após selecionar a validação de dados está mostrada na figura 10. Na opção “permitir”, deve ser selecionada a opção “lista” para que seja criada uma lista dos valores no campo do diâmetro preferencial de fio, como mostrado na figura 11. No campo “fonte”, deve ser colocada a função “INDIRETO”, onde deve ser incluída na função a tabela listada com os materiais. Na figura 10 aparece dentro da função indireto a palavra “Material”. Isto ocorre porque a tabela com os possíveis materiais listados foi renomeada com este nome.

Figura 10 – Validação de dados realizado no campo do diâmetro de fio.



Fonte: autor

Figura 11 – Tela de inputs com lista de valores condicionada.

The screenshot shows a software interface titled "INPUTS" in a dark blue header. Below the header, there is a light blue background with several input fields and a dropdown menu. The fields are labeled as follows:

- Força Mínima (Fmin): 222,4 N
- Força Máxima (Fmax): 378,1 N
- Tipos de Extremidades: Ganchos padronizados
- Material da Mola: Fio_musical
- Diâmetro inicial de fio (d): 5,00 m
- Índice C do gancho (C2): A dropdown menu is open, showing a list of values: 2,20, 2,50, 2,80, 3,00, 3,50, 4,00, 4,50, and 5,00. The value 5,00 is currently selected and highlighted in blue.
- Deflexão dinâmica da mola(y): m

Fonte: autor

Após preencher todos os dados, o usuário deve clicar no botão “Execução”, e aguardar até que a tela com os resultados seja exibida.

3.2 BANCO DE DADOS

Alguns dados precisam ser tabelados para o melhor funcionamento do programa. Para isso, foi criado um banco de dados para relacionar algumas constantes, e para tornar possíveis algumas validações de dados condicionais, como a do diâmetro de fio condicionada ao material, mostrado na figura 12. Outro exemplo das tabelas do banco de dados é mostrado na figura 13. Além disso, o banco de dados fica oculto para o usuário do programa, impedindo que ele seja modificado.

Figura 12 – Banco de dados dos diâmetros de fio por material.

D	E	F	G	H	I	J
Fio_encruado ▾		Fio_musical ▾		Fio_revenido ▾		Cromo_V ▾
0,70		0,10		0,50		0,80
0,80		0,12		0,55		0,90
0,90		0,16		0,60		1,00
1,00		0,20		0,65		1,10
1,10		0,25		0,70		1,20
1,20		0,30		0,80		1,40
1,40		0,35		0,90		1,60
1,60		0,40		1,00		1,80
1,80		0,45		1,10		2,00
2,00		0,50		1,20		2,20
2,20		0,55		1,40		2,50
2,50		0,60		1,60		2,80
2,80		0,65		1,80		3,00
3,00		0,70		2,00		3,50
3,50		0,80		2,20		4,00
4,00		0,90		2,50		4,50
4,50		1,00		2,80		5,00
5,00		1,10		3,00		5,50
5,50		1,20		3,50		6,00
6,00		1,40		4,00		6,50
6,50		1,60		4,50		7,00
7,00		1,80		5,00		8,00
8,00		2,00		5,50		9,00
9,00		2,20		6,00		10,00
10,00		2,50		6,50		11,00
11,00		2,80		7,00		
12,00		3,00		8,00		

Fonte: autor

Figura 13 – Exemplo de tabela do banco de dados do software.

Material	b	A	Fator de correlação
Fio_encruado	-0,1822	1753,3	0,998
Fio_musical	-0,1625	2153,5	0,9997
Fio_revenido	-0,1833	1831,2	0,999
Cromo_V	-0,1453	1909,9	0,998
Cromo_S	-0,0934	2059,2	0,991

Fonte: autor

O banco de dados é essencial para a automatização do projeto. Ele possibilita que diferentes dados inseridos pelo usuário sejam relacionados com suas características e constantes específicas, sem precisar que se altere valores manualmente.

3.3 TABELA DE CÁLCULOS

No programa, uma tabela fica oculta para o usuário, onde são realizados os cálculos à partir dos dados inseridos de 27 molas, para $3 \leq C \leq 16$. Nesta tabela, que é mostrada nas figuras 14 e 15, os índices C são as colunas e os parâmetros calculados, as linhas. Os cálculos são feitos mutuamente, para as 27 molas, assim que os parâmetros são inseridos pelo usuário na aba “INPUT”.

Figura 14 – Parte da tabela de cálculos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	C	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50
2	Diâmetro médio da espira (D) [mm]	15,00	17,50	20,00	22,50	25,00	27,50	30,00	32,50	35,00	37,50	40,00	42,50
3	Tensão inicial de espira (Ti1) [Mpa]	137,88	129,81	122,21	115,06	108,34	102,03	96,10	90,53	85,31	80,41	75,80	71,47
4	Tensão inicial de espira (Ti2) [Mpa]	202,01	193,00	184,37	176,09	168,15	160,54	153,24	146,24	139,52	133,07	126,86	120,89
5	Tensão inicial de espira (Ti) [Mpa]	169,95	161,41	153,29	145,57	138,25	131,28	124,67	118,39	112,42	106,74	101,33	96,18
6	Fator de Cisalhamento Direto (Ks)	1,17	1,14	1,13	1,11	1,10	1,09	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06
7	Força de Tração Inicial na espira (Fi) [N]	476,70	396,15	334,42	285,83	246,77	214,81	188,30	166,04	147,15	130,98	117,04	104,91
8	Verificação $F_i < F_{min}$ (superar a pré-carga que ocorre na fabricação da mola)	REPROVADO	REPROVADO	REPROVADO	REPROVADO	REPROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO
9	Força média (Fm) [N]	300,25	300,25	300,25	300,25	300,25	300,25	300,25	300,25	300,25	300,25	300,25	300,25
10	Força Alternada (Fa) [N]	77,85	77,85	77,85	77,85	77,85	77,85	77,85	77,85	77,85	77,85	77,85	77,85
11	Tensão de Cisalhamento Média (tm) [Mpa]	107,04	122,33	137,62	152,92	168,21	183,50	198,79	214,08	229,37	244,67	259,96	275,25
12	Fator de Wahl (Kw)	1,58	1,48	1,40	1,35	1,31	1,28	1,25	1,23	1,21	1,20	1,18	1,17
13	Tensão de Cisalhamento Alternada (ta) [Mpa]	37,59	40,96	44,53	48,21	51,96	55,76	59,59	63,45	67,32	71,21	75,11	79,02
14	Limite de resistência à tração do fio (Sut) [MPa]	1657,91	1657,91	1657,91	1657,91	1657,91	1657,91	1657,91	1657,91	1657,91	1657,91	1657,91	1657,91
15	Limite de resistência ao cisalhamento do fio (Sus) [Mpa]	1105,83	1105,83	1105,83	1105,83	1105,83	1105,83	1105,83	1105,83	1105,83	1105,83	1105,83	1105,83
16	Limite de resistência ao escoamento sob torção (Sys) [Mpa]	746,1	746,1	746,1	746,1	746,1	746,1	746,1	746,1	746,1	746,1	746,1	746,1
17	Limite de duração do fio de molas não-jateadas (Sew) [Mpa]	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310
18	Limite de resistência à fadiga em condições alternadas (Ses) [Mpa]	180,3	180,3	180,3	180,3	180,3	180,3	180,3	180,3	180,3	180,3	180,3	180,3
19	Tensão de cisalhamento mínima (tmin) [Mpa]	79,3	90,6	101,9	113,3	124,6	135,9	147,2	158,6	169,9	181,2	192,6	203,9
20	OCS para espiras em torção (Nfs)	3,97	3,59	3,25	2,96	2,71	2,49	2,30	2,13	1,98	1,85	1,73	1,62
21	Aprovado em torção?	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO
22	C1 (gancho)	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9
23	Kb (gancho)	1,33	1,27	1,23	1,20	1,18	1,16	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10	1,10
24	σs (gancho) [Mpa]	67,40	74,54	81,94	89,49	97,14	104,85	112,60	120,39	128,20	136,03	143,87	151,72

Fonte: autor

Figura 15 – Parte da tabela de cálculos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	C	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50
24	σs (gancho) [MPa]	98,69	109,14	119,37	131,03	142,23	153,51	164,87	176,27	187,70	199,16	210,64	222,16
25	σm (gancho) [MPa]	305	337	371	405	439	474	509	545	580	615	650	685
26	σmin (gancho) [MPa]	206	228	251	274	297	321	344	368	392	416	440	464
27	Conversão da resistência de endurance torcional em 1 resistência de endurance por tração (Se) [MPa]	321	321	321	321	321	321	321	321	321	321	321	321
28	Coefficiente de segurança à fadiga para o gancho em flexão (Nfb)	2,27	2,01	1,80	1,61	1,46	1,32	1,20	1,10	1,01	0,93	0,85	0,78
29	Gancho em flexão aprovado em fadiga?	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO
30	R2 (gancho)	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
31	Kw2 (gancho)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
32	Tensão de torção alternada no gancho (τBa) [MPa]	40,06	46,73	53,41	60,08	66,76	73,44	80,11	86,79	93,46	100,14	106,82	113,50
33	Tensão de torção média no gancho (τBm) [MPa]	123,74	144,36	164,98	185,60	206,23	226,85	247,47	268,10	288,72	309,34	329,96	350,58
34	Tensão de torção mínima no gancho (τBmin) [MPa]	83,68	97,63	111,57	125,52	139,47	153,41	167,36	181,31	195,25	209,20	223,15	237,10
35	Coefficiente de segurança à fadiga do gancho em torção (Nfs)	3,53	2,97	2,56	2,24	1,98	1,77	1,59	1,44	1,32	1,21	1,10	1,00
36	Gancho em torção aprovado em fadiga?	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO
37	Constante K da mola [N/mm]	11,49	11,49	11,49	11,49	11,49	11,49	11,49	11,49	11,49	11,49	11,49	11,49
38	Número de espiras ativas (Na)	130,25	82,02	54,95	38,59	28,13	21,14	16,28	12,81	10,25	8,34	6,84	5,64
39	Número de espiras ativas real (Na real)	131,00	83,00	55,00	39,00	29,00	22,00	17,00	13,00	11,00	9,00	7,50	6,25
40	Constante K da mola real [N/mm]	11,42	11,35	11,48	11,37	11,14	11,04	11,00	11,32	10,71	10,64	10,64	10,64
41	Número de espiras totais (Nt)	132,00	84,00	56,00	40,00	30,00	23,00	18,00	14,00	12,00	10,00	8,50	7,25
42	Comprimento do corpo (Lb) [mm]	528,00	336,00	224,00	160,00	120,00	92,00	72,00	56,00	48,00	40,00	34,00	28,00
43	Diâmetro externo da mola (De) [mm]	16,00	18,00	20,00	22,00	24,00	26,00	28,00	30,00	32,00	34,00	36,00	38,00
44	Diâmetro interno da mola (Di) [mm]	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
45	Comprimento livre (Lf) [mm]	544,00	356,00	248,00	188,00	152,00	128,00	112,00	100,00	96,00	92,00	88,00	84,00
46	Deflexão para alcançar a maior das 2 forças especificadas (ymax) [mm]	-0,59	3,94	7,34	10,15	12,59	14,57	16,16	16,97	19,06	20,16	21,26	22,36
47	Peso Total da mola (Wt) [kg]	0,50	0,37	0,28	0,23	0,19	0,16	0,14	0,11	0,11	0,09	0,08	0,07

Fonte: autor

A partir da linha 2 da tabela de excel exibida na figura 14, se iniciam os cálculos dos parâmetros, que vão da coluna B até a coluna AB, totalizando assim as 27 molas.

Na linha 2 da tabela exibida na figura 14, é calculado o diâmetro médio da espira D, em milímetros. Sua linha de comando no Excel está presente no apêndice A, nomeado como A.1, e representa a equação (7) demonstrada na fundamentação teórica.

Nas linhas 3, 4 e 5 da tabela de Excel da figura 14 é calculada a tensão de pré-carga τ_i . Suas respectivas fórmulas no Excel são descritas no apêndice A, nomeadas como A.2, A.3 e as respectivas equações são as demonstradas na fundamentação teórica nas equações (10) e (11). A linha de comando demonstrada em A.4 é a média dos valores encontrados em A.2 e A.3, do apêndice A. Nas linhas de comando de excel, A.2 e A.3 estão multiplicados por uma constante, para converter o valor de psi para MPa.

Na linha 6 da tabela de Excel exibida na figura 14, é calculado o primeiro fator adimensional: o fator de cisalhamento direto K_s . Sua respectiva linha de comando no Excel está descrito no apêndice A, no item A.5. A equação também é demonstrada na fundamentação teórica, na equação (19).

Na linha 7 da tabela da figura 14, é realizado o cálculo do primeiro valor verificável. O valor da força inicial de tração F_i deve ser menor do que o valor da força mínima F_{min} , definida pelo usuário na aba “INPUT”. Se a força inicial F_i for maior do que a força mínima F_{min} , não haverá deflexão da mola. Com isso, na linha 8 da tabela da figura 14, é feita a verificação das cargas, aprovando ou reprovando o projeto já nesta etapa. No apêndice A, as linhas de comando do Excel estão demonstradas nos itens A.6 e A.7, respectivamente. Além disso, a equação para este cálculo está demonstrada na fundamentação teórica, através da equação (15), onde para determinar seu valor basta resolver a equação para F e utilizar a tensão de cisalhamento inicial. Os valores das forças são expressos em Newtons.

A tabela da figura 14 traz nas linhas 9 e 10 as forças média F_m e alternada F_a , em Newtons, a partir dos dados inseridos pelo usuário das cargas máximas e mínimas. Suas fórmulas no Excel estão no apêndice A, nos itens A.8 e A.9, e representados na fundamentação teórica, nas equações (8) e (9), respectivamente.

A tensão de cisalhamento média τ_m é calculada na linha 11 da tabela na figura 14. Aqui, utiliza-se o fator de cisalhamento direto, pois, Segundo Norton (2013), para a tensão de cisalhamento média, o fator de concentração de tensão deve ser considerado igual a 1,0. A unidade utilizada é MPa. Na fundamentação teórica, esta tensão está descrita no Quadro 1 e sua respectiva representação no Excel está demonstrada no apêndice A, no item A.10.

Por último, antes de obter os outros valores das tensões e dos limites de resistência, é necessário calcular o fator de Wahl K_w , que é calculado na linha 12 da tabela da figura 14. Sua equação é demonstrada na equação (20), presente na fundamentação teórica, e a fórmula do Excel para o fator de Wahl está no item A.11 do apêndice A. O fator de Wahl também é calculado para as extremidades (K_{w2}), na linha 31 da tabela de Excel presente na figura 15. Além disso, sua fórmula de Excel está no item A.29, no apêndice A.

A tensão de cisalhamento alternada τ_a tem seu valor, em MPa, obtido na linha 13 da tabela exibida na figura 14. Esta tensão está descrita no quadro 1 e sua fórmula no Excel é mostrada no item A.12 do apêndice A.

A linha 19 da figura 14 traz o valor da tensão de cisalhamento mínima τ_{min} , em MPa, descrita no quadro 1, com a sua função no Excel sendo descrita no apêndice A, item A.13.

Nas linhas 14, 15, 16, 17 e 18 da tabela da figura 14, obtêm-se os valores, em MPa, do limite de resistência à tração do fio S_{ut} , demonstrada na equação (1), limite de resistência ao cisalhamento do fio S_{us} , equação (2), limite ao escoamento sob torção S_{ys} , que é definida na tabela 4, o limite de duração do fio de molas não-jateadas S_{ew} , descrita na equação (3) e o limite de resistência à fadiga em condições alternadas S_{es} , equação (4). Todas as equações estão demonstradas na fundamentação teórica. As fórmulas no Excel, com exceção do limite de duração do fio de molas não-jateadas (linha 17 da tabela na figura 14) que é uma constante, estão no apêndice A, nos itens A.14, A.15, A.16 e A.17, respectivamente.

Com estes dados disponíveis, é possível realizar a segunda verificação do projeto. Nas linhas 20 e 21 da tabela de Excel mostrada na figura 14, é realizado o cálculo do coeficiente de segurança das espiras em torção N_{fs} , descrita na equação (21) demonstrada na fundamentação teórica, e a verificação da aprovação ou não do critério, sendo que é retornado

“APROVADO” caso o valor seja maior ou igual a 1 e “REPROVADO” caso seja inferior a 1. As fórmulas no Excel estão no apêndice A, representadas nos itens A.18 e A.19 do mesmo apêndice.

Da linha 22 até a linha 36 da tabela nas figuras 14 e 15, são feitos os cálculos e análises relativas aos ganchos. O primeiro fator calculado é o índice C1 do gancho, demonstrado na equação (14), com sua fórmula no Excel representada no apêndice A, no item A.20 do apêndice.

Na linha 23 da tabela na figura 14 é verificado o fator K_b , que é utilizado nos cálculos das tensões dos ganchos. No item A.21, do apêndice A, têm-se a fórmula no Excel para o fator, e a equação (13) da fundamentação teórica é a que demonstra o cálculo necessário para se obter o fator.

Com estes valores disponíveis, calcula-se as tensões de flexão atuantes no gancho, em MPa. Nas linhas 24, 25 e 26 da tabela Excel mostrada na figura 15, obtêm-se os valores da tensão de flexão alternada σ_a (equação (1), presente na fundamentação teórica), a tensão de flexão média σ_m (presente no quadro 1) e a tensão de flexão mínima $\sigma_{\min}$ (presente no quadro 1). Suas fórmulas no Excel estão no apêndice A e são, respectivamente, os itens A.22, A.23 e A.24.

O último fator para que se possa fazer a terceira verificação do projeto, que é a conversão da resistência de endurance torcional em resistência de endurance por tração S_e é calculado na linha 27, em MPa. Esta resistência é discutida na fundamentação teórica através da equação (5) e sua fórmula utilizada no Excel está demonstrada no item A.25, do apêndice A.

A partir deste ponto, nas linhas 28 e 29 da tabela de Excel na figura 15, verifica-se se os ganchos estão aprovados em flexão ou não, através do coeficiente de segurança à fadiga para o gancho em flexão N_{fb} , demonstrado na fundamentação teórica através da equação (22). O mesmo critério utilizado para o fator de segurança anterior será utilizado nesse. Se o coeficiente for maior ou igual a 1, o resultado na linha 29 da tabela de Excel na figura 15 será “APROVADO”. Caso o contrário, será “REPROVADO”. As fórmulas no Excel do cálculo e a verificação de aprovação são, respectivamente, os itens A.26 e A.27 do apêndice A.

Da linha 30 até a linha 36 da tabela de Excel na figura 15, são realizados cálculos e análises para verificar os ganchos em torção. Na linha 30 da tabela de Excel presente na figura 15, é calculado o R_2 . Sua fórmula no Excel está no apêndice A, no item A.28 e a sua equação descrita na fundamentação teórica é a equação (18).

Da linha 32 até a linha 34 da tabela presente na figura 15, são calculadas as tensões de torção no gancho, em MPa. As fórmulas de Excel da tensão de torção alternada no gancho τ_{Ba} , tensão de torção média no gancho τ_{Bm} e a tensão de torção mínima no gancho $\tau_{B\min}$ estão no apêndice A, através dos itens A.30, A.31 e A.32. Além disso, elas estão presentes na fundamentação teórica. A equação da tensão de torção alternada é a equação (15), enquanto as tensões de torção mínima e média no gancho estão descritas no quadro 1.

Com isso, é possível determinar o coeficiente de segurança à fadiga do gancho em torção N_{fs} (equação (23)), na linha 35 da tabela presente na figura 15, e realizar a quarta verificação do projeto, na linha 36 da tabela na figura 15. No Excel, as respectivas fórmulas estão representadas no apêndice A, nos itens A.33 e A.34. O mesmo critério dos anteriores é utilizado.

A constante K inicial da mola, em Newtons por milímetros, é definida na linha 37 da tabela na figura 15. O apêndice A traz a fórmula em Excel através do item A.35. Sua equação é demonstrada na fundamentação teórica, através da equação (24).

Com a constante K , é possível calcular o número de espiras ativas da mola N_a (equação (25)), o que é realizado na linha 38 da tabela na figura 15. Porém, é necessário que haja um arredondamento no número de espiras para algo que seja possível ou que facilite a fabricação. Com isso, é necessário que aja um arredondamento do número de espiras calculado, o que ocorre na linha 39 da tabela na figura 15 e ambas as fórmulas de Excel estão nos itens A.36 e A.37 do apêndice A, respectivamente.

Para possibilitar a automatização do projeto sem causar prejuízos no projeto, foi definido que o arredondamento é para cima, em qualquer circunstância.

Com o número real de espiras ativas definido, é possível obter o valor real da constante K . Isso é feito na linha 40 da tabela de cálculos demonstrada na figura 15, com a fórmula de Excel descrita no apêndice A através do item A.38.

Com o número de espiras ativas real definido, determina-se em seguida o número de espiras totais N_t (equação (26)), na linha 41 da tabela na figura 15, que tem sua fórmula de Excel descrita no apêndice A, no item A.39.

O comprimento do corpo L_b (equação (29)), que tem sua fórmula no Excel no apêndice A, item A.40, e é calculado na linha 42 da tabela mostrada na figura 15, em milímetros.

O diâmetro externo D_e (equação (27)) e interno D_i (equação (28)) da mola são definidos nas linhas 43 e 44 da tabela demonstrada na figura 15, também em milímetros, e suas fórmulas Excel estão demonstradas através dos itens A.41 e A.42 do apêndice A.

O comprimento livre L_f (equação (30)), calculado em milímetros na linha 45 da tabela de Excel na figura 15, tem sua fórmula do Excel demonstrada no apêndice A, item A.43.

Um fator importante de ser calculado, para fins de projeto, é a deflexão para alcançar a maior das duas forças especificadas $y_{\max}$ (fórmula no Excel demonstrada no apêndice A, item A.44, que é calculada na linha 46 da tabela demonstrada na figura 15).

O peso total (equação (31)) é definido na linha 47 da tabela presente na figura 15 e sua fórmula no Excel esta no item A.45 do apêndice A.

3.4 TELA DE RESULTADOS

A tabela de cálculos, como dito anteriormente, fica oculta ao usuário do programa. O intuito é que apenas as informações necessárias para a seleção da mola sejam mostradas, de forma a simplificar o entendimento e minimizar erros. Com isso, todas as informações pertinentes são mostradas na tela de resultados. Os parâmetros que são mostrados ao usuário estão listados no quadro 2.

Foi realizada uma programação em VBA para a seleção dos principais parâmetros e para que apenas as molas aprovadas na tabela de cálculos seja transportada para a tela de resultados. Com isso, após preencher os inputs e clicar no botão de execução, o usuário terá a tela de resultados, mostrada na figura 16, exibida juntamente com uma mensagem de molas aprovadas caso aja alguma, conforme mostrado na figura 17, ou uma mensagem que nenhuma mola foi aprovada nos parâmetros selecionados pelo usuário, de acordo com a figura 18.

Quadro 2 – Parâmetros exibidos ao usuário na tela de resultados.

<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>
<i>C</i>	<i>Índice C das molas aprovadas</i>
<i>Diâmetro médio da espira D</i>	<i>O diâmetro médio da espira para as molas aprovadas, em milímetros.</i>
<i>Força de tração inicial na espira Fi</i>	<i>A pré-carga de fabricação para as molas aprovadas, em Newton.</i>
<i>Verificação $F_i < F_{min}$</i>	<i>A confirmação de aprovação que a força mínima especificada supera a pré-carga.</i>
<i>O CS para espiras em torção Nfs</i>	<i>O coeficiente de segurança para espiras em torção das molas aprovadas.</i>
<i>Aprovado em torção?</i>	<i>A confirmação de aprovação dos coeficientes de segurança para as espiras em torção</i>
<i>CI</i>	<i>O índice CI dos ganchos da mola</i>
<i>Coeficiente de segurança à fadiga para o gancho em flexão Nfb</i>	<i>O coeficiente de segurança para os ganchos em flexão das molas aprovadas.</i>
<i>Gancho em flexão aprovado em fadiga?</i>	<i>A confirmação de aprovação dos coeficientes de segurança para os ganchos em flexão solicitados em fadiga.</i>
<i>R2</i>	<i>O raio R2 dos ganchos, em milímetros.</i>
<i>Coeficiente de segurança à fadiga do gancho em torção Nfs</i>	<i>O coeficiente de segurança para os ganchos em torção das molas aprovadas.</i>
<i>Gancho em torção aprovado em fadiga?</i>	<i>A confirmação de aprovação dos coeficientes de segurança para os ganchos em torção solicitados em fadiga.</i>
<i>Número de espiras ativas real(Na real)</i>	<i>O número de espiras ativas real, após o arredondamento do valor calculado.</i>

<i>Constante K da mola real</i>	<i>A constante K das molas aprovadas, já recalculada com o número de espiras ativas real, em Newton por milímetros.</i>
<i>Número de espiras totais Nt</i>	<i>O número total de espiras das molas aprovadas.</i>
<i>Comprimento do corpo Lb</i>	<i>O comprimento do corpo das molas aprovadas, em milímetros.</i>
<i>Diâmetro Externo da mola De</i>	<i>O diâmetro externo das molas aprovadas, em milímetros.</i>
<i>Diâmetro Interno da mola Di</i>	<i>O diâmetro interno das molas aprovadas, em milímetros.</i>
<i>Comprimento livre Lf</i>	<i>O comprimento livre das molas aprovadas, em milímetros.</i>
<i>Deflexão para alcançar a maior das 2 forças especificadas y_{max}</i>	<i>A deflexão para alcançar a maior força especificada, em milímetros.</i>
<i>Peso Total da mola Wt</i>	<i>O peso total para as molas aprovadas, em quilogramas.</i>

Fonte: autor

Figura 16 – Tela de resultados.

C	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50	10,00
Diâmetro médio da espira (D) [mm]	27,50	30,00	32,50	35,00	37,50	40,00	42,50	45,00	47,50	50,00
Força de Tração inicial na espira (F _i) [N]	214,81	188,30	166,04	147,15	130,98	117,04	104,91	94,31	84,99	76,73
Verificação F _i < F _{min} (superar a pré-carga que ocorre na fabricação da mola)	APROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVAD									
DCO para espiras em $\frac{N}{mm^2}$	2,49	2,30	2,13	1,98	1,85	1,73	1,62	1,52	1,44	1,36
Aprovado em torção?	APROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVAD									
C1 (gancho)	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10
Coefficiente de segurança à fadiga para o gancho em flexão (N _f)	2,05	1,88	1,73	1,60	1,48	1,37	1,28	1,19	1,12	1,05
Gancho em flexão aprovado em fadiga?	APROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVAD									
R2 (gancho)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Coefficiente de segurança à fadiga do gancho em torção	2,44	2,21	2,01	1,83	1,68	1,55	1,44	1,34	1,25	1,16
Gancho em torção aprovado em fadiga?	APROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVADCAPROVAD									
Número de espiras ativas real (N _a real)	25,00	20,00	15,00	13,00	10,00	9,00	7,00	6,00	5,00	5,00
Constante K da mola real [N/mm]	12,14	11,69	12,26	11,33	11,97	10,96	11,75	11,55	11,78	10,10
Número de espiras totais (N _t)	26,00	21,00	16,00	14,00	11,00	10,00	8,00	7,00	6,00	6,00

Fonte: autor

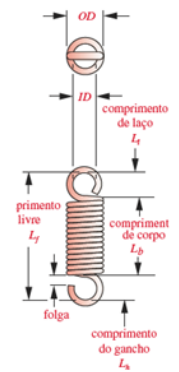
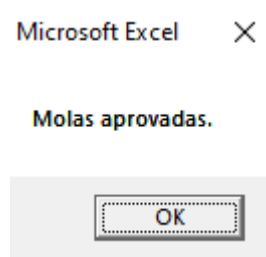
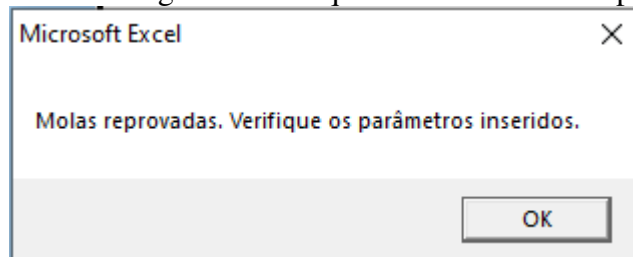


Figura 17 – Mensagem exibida quando há molas aprovadas.



Fonte: autor

Figura 18 – Mensagem exibida quando não há molas aprovadas.



Fonte: autor

3.4.1 Programação VBA

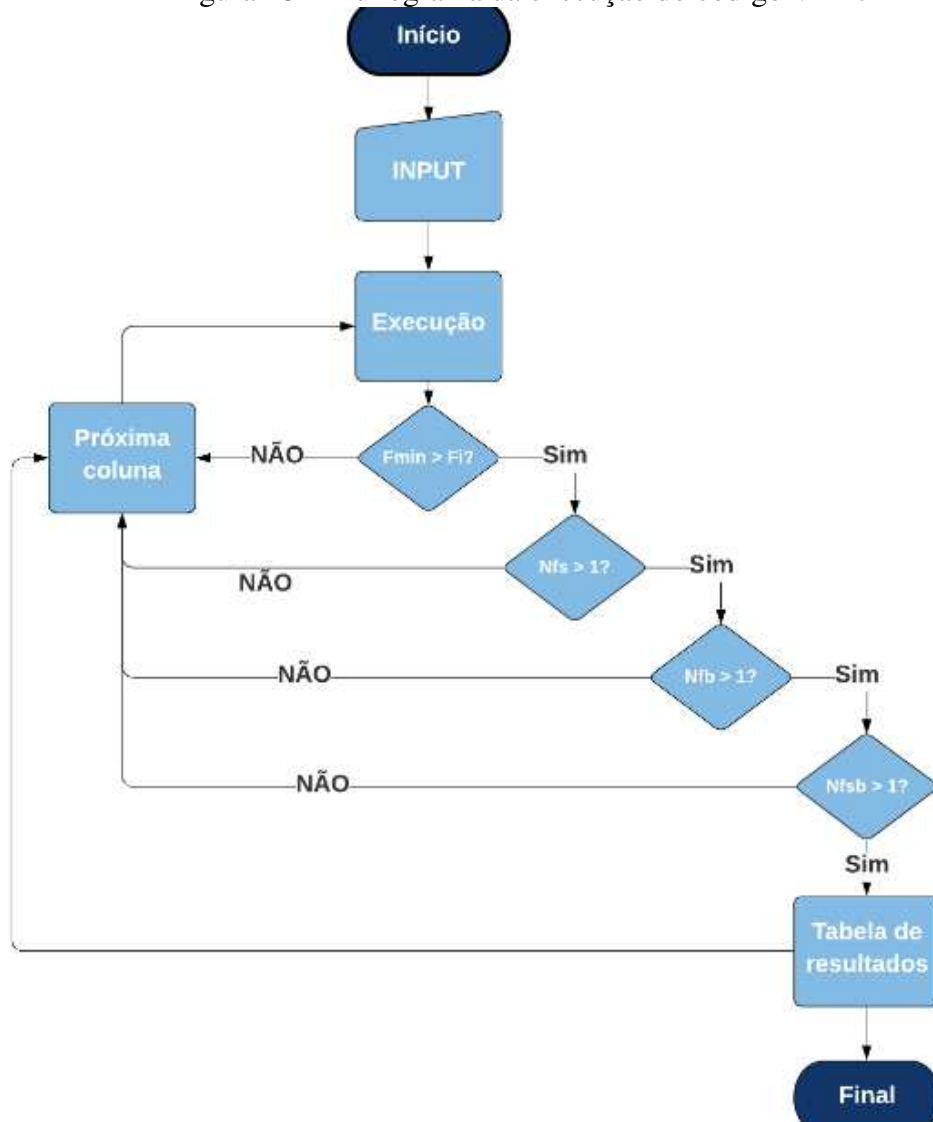
A primeira tela que é mostrada para o usuário ao iniciar o programa é a tela inicial. Para iniciar o projeto da mola, deve-se clicar no símbolo no centro da tela, que executa a linha de código mostrada no item B.1 do apêndice B.

Após incluir os campos na aba “INPUT” e clicar no botão de execução, o usuário é automaticamente movido para a tela de resultados (figura 16), onde começa a ser montada a tabela com as molas que foram aprovadas. Os detalhes das etapas de execução do código estão descritas no apêndice B, item B.2.

Caso haja ao menos uma mola aprovada, surgirá a mensagem de que as molas foram aprovadas (figura 17). Após o usuário selecionar “OK”, a última parte do código, que está descrita no apêndice B, item B.3, entra em execução. Nesta parte final, é realizado o ajuste da tela de resultados, selecionando apenas os parâmetros necessários para construção ou especificação da mola.

A figura 18 mostra um fluxograma da execução do código VBA, com a finalidade de ilustrar as etapas do código desenvolvido, que se encontra detalhado no apêndice B.

Figura 18 – Fluxograma da execução do código VBA.



Fonte: autor

3.4.2 Gráficos

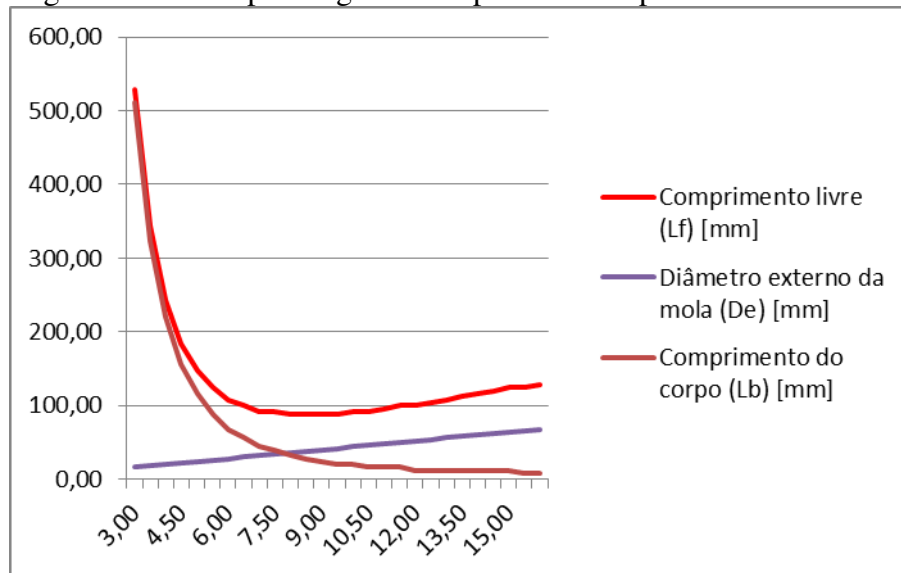
Para auxiliar o usuário a selecionar a melhor mola para sua aplicação, a tela de resultados também exibe gráficos que podem ajudar em uma tomada de decisão. Além disso, os gráficos possibilitam uma visibilidade de como o acréscimo ou decréscimo do índice C pode afetar o projeto. Os gráficos são realizados à partir da tabela de cálculos, e são gerados automaticamente.

Todos os gráficos foram baseados na variação do índice C, por ser um fator determinante tanto para parâmetros construtivos e operacionais, quanto para parâmetros de segurança. Será discutido neste trabalho, mais à frente no estudo de caso, os resultados obtidos tanto nos gráficos, quanto na tabela de resultados.

O primeiro gráfico, na figura 19, mostra os parâmetros construtivos e operacionais, variando com o índice C. Aqui, o usuário pode verificar fatores determinantes para o projeto, como por exemplo o comprimento livre.

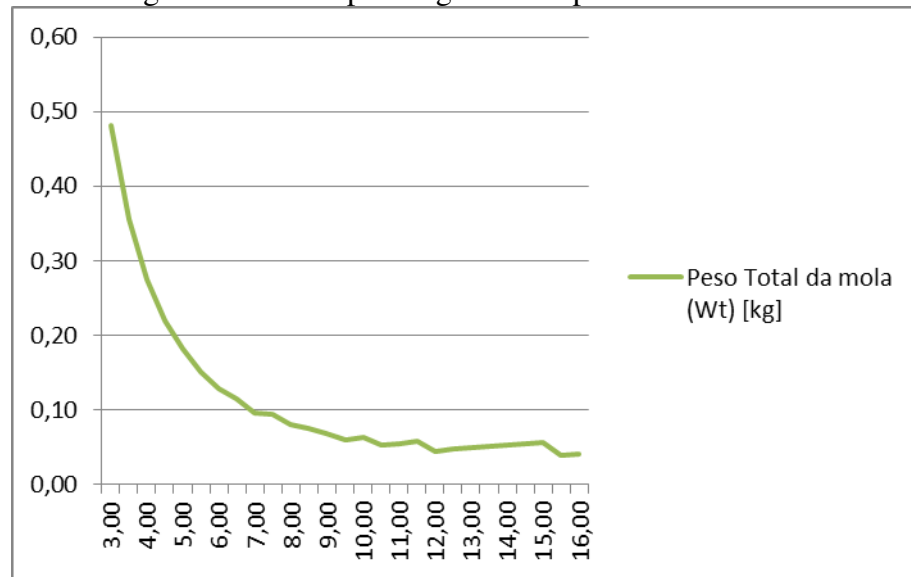
Na figura 20, o gráfico mostra a variação de peso total da mola com o índice C.

Figura 19 – Exemplo do gráfico de parâmetros operacionais e construtivos.



Fonte: autor

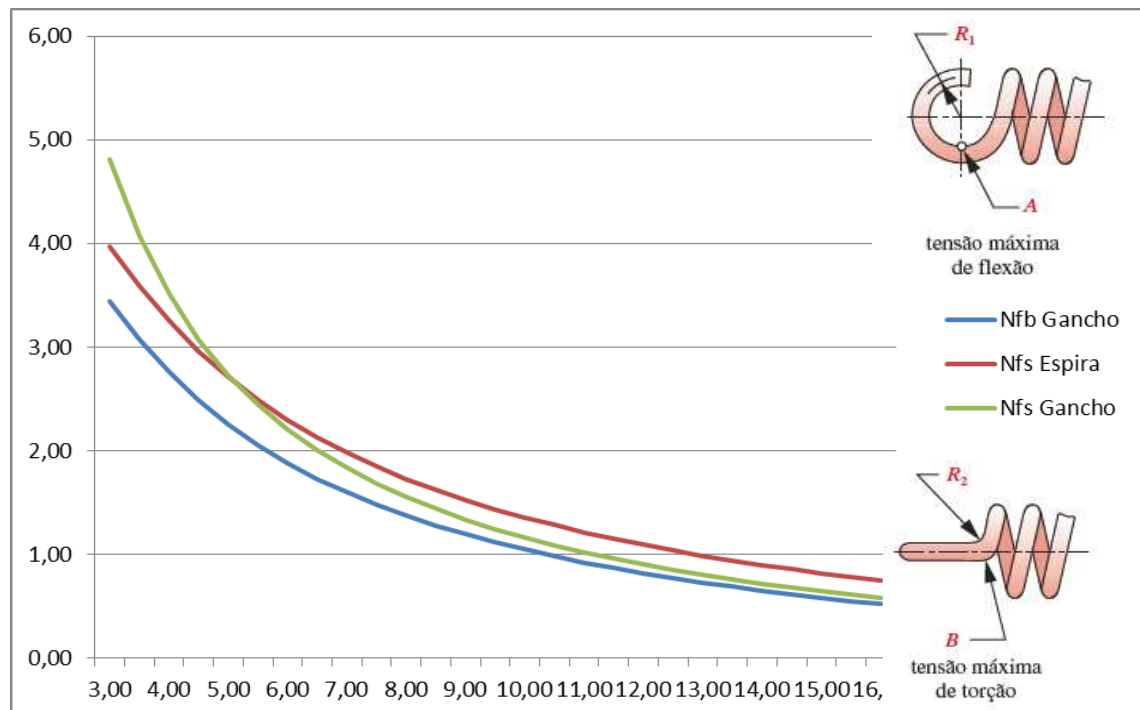
Figura 20 – Exemplo do gráfico de peso total da mola.



Fonte: autor

Outro gráfico exibido é o de coeficientes de segurança. Ele é mostrado lado a lado com o gráfico da figura 19, pois ambos devem ser avaliados em conjunto para uma melhor análise. Um exemplo do gráfico está exibido na figura 21. Tanto as espiras quanto os ganchos estão plotados no mesmo eixo e variando com o índice C.

Figura 21 – Exemplo do gráfico dos coeficientes de segurança.



Fonte: autor

Uma das proposições deste trabalho é trazer novas abordagens para a avaliação do usuário. Na bibliografia tradicional, não há gráficos que demonstrem como a variação do índice C2 afeta o coeficiente de segurança à fadiga do gancho em torção N_{fs} . Com isso, um gráfico foi proposto. Para a sua realização, como originalmente o índice C2 é mantido

constante, como um input do usuário, foi necessário criar uma nova tabela de cálculos, separada da que fornece todos os parâmetros, exclusivamente para a obtenção do gráfico. Esta tabela é exibida na figura 22. Assim como o restante do trabalho, a tabela tem conexões com a tela de inputs e com a tabela de cálculos original, porém variando C2 e os parâmetros subsequentes a ele.

Figura 22 – Tabela de cálculos com variação de C2.

C2	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R2 (gancho)	10,00	12,50	15,00	17,50	20,00	22,50	25,00	27,50	30,00
Kw2 (gancho)	1,25	1,19	1,15	1,13	1,11	1,09	1,08	1,08	1,07
Diâmetro médio da espira (D)[mm]	15,00	17,50	20,00	22,50	25,00	27,50	30,00	32,50	35,00
Tensão de torção alternada no gancho (τ_{Ba}) [Mpa]	29,74	32,96	36,48	40,14	43,90	47,70	51,54	55,41	59,29
Tensão de torção média no gancho (τ_{Bm}) [Mpa]	114,69	127,11	140,68	154,83	169,30	183,98	198,79	213,70	228,68
Tensão de torção mínima no gancho (τ_{Bmin}) [Mpa]	84,95	94,15	104,21	114,68	125,40	136,27	147,25	158,29	169,39
Coefficiente de segurança à fadiga do gancho em torção (Nfs)	4,81	4,30	3,85	3,46	3,13	2,85	2,61	2,40	2,21

Fonte: autor

A tabela de Excel mostrada na figura 22 começa na linha 1, com C2 variando da coluna B a J, mantendo o valor entre 4 a 12, o que é recomendado para os ganchos. Assim como na tabela de cálculos original, as fórmulas de Excel estão descritas no apêndice A.

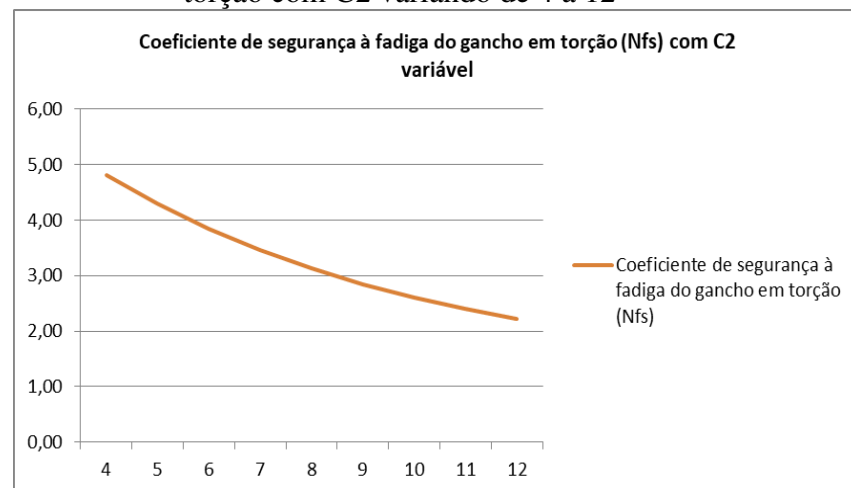
A tabela 5 demonstra quais são as equações ou descrições teóricas e onde se encontram no apêndice A as respectivas fórmulas de Excel. A figura 23 é um exemplo do resultado do gráfico, que será discutido mais a fundo no estudo de caso.

Tabela 5 – Parâmetros da tabela de Excel da figura 22 e suas respectivas fórmulas no excel e equações teóricas

Parâmetros	Equação/desc rição teórica	Fórmula Excel (apêndice A)	Un.
Raio do lado flexionado (R2)	(18)	A.46	mm
Fator de Wahl para os ganchos (Kw2)	(16)	A.47	-
Diâmetro médio da espira (D)	(7)	A.48	Mm
Tensão de torção alternada no gancho (τ_{Ba})	(15)	A.49	MPa
Tensão de torção média no gancho (τ_{Bm})	Quadro 1	A.50	MPa
Tensão de torção mínima no gancho (τ_{Bmin})	Quadro 1	A.51	MPa
Coefficiente de segurança à fadiga do gancho em torção (Nfs)	(23)	A.52	-

Fonte: autor

Figura 23 – Exemplo do gráfico de coeficiente de segurança à fadiga do gancho em torção com C2 variando de 4 a 12



Fonte: autor

O gráfico da figura 23 também é exibido na tela de resultados para o usuário.

4 RESULTADOS

4.1 ESTUDO DE CASO

Para verificação do programa, foi realizado um estudo de caso, onde o valor do índice C foi fixado, e cálculos foram realizados utilizando o software e também manualmente. A figura 24 traz os valores e parâmetros que foram utilizados no estudo de caso. Já na tabela 6, os resultados deste estudo estão exibidos.

Figura 24 – Valores utilizados no estudo de caso.

INPUTS	
Força Mínima (Fmin):	150 N
Força Máxima (Fmax):	300 N
Tipos de Extremidades:	Ganchos padronizados
Material da Mola:	Fio revenido
Diâmetro inicial de fio (d):	4,00 mm
Índice C do gancho (C2):	6
Deflexão dinâmica da mola(y):	12,7 mm
Execução	

Fonte: autor

Tabela 6 – Comparativa de valores do estudo de caso.

Parâmetros	Cálculos manuais	Cálculos programa	Un.
Fmin	152,4	152,4	N
Fmax	298,3	298,3	N
Extremidades	Ganchos pad.	Ganchos pad.	-
Material	Fio revenido	Fio revenido	-
d	4,00	4,00	mm
y	12,7	12,70	mm
C	6	6	-
D	24,00	24,00	mm
τ_{i1}	96,10	96,10	Mpa
τ_{i2}	153,24	153,24	Mpa
τ_i	124,67	124,67	Mpa
Ks	1,08	1,08	-
Fi	120,88	120,51	N
Fi<Fmin	Aprovado	Aprovado	-
Fm	225,35	225,35	N
Fa	72,95	72,95	N
Continua	Na próxima	Página	-----

τ_m	232,41	233,13	Mpa
Kw	1,25	1,25	-
τ_a	87,08	87,25	Mpa
Sut	1420,29	1420,29	Mpa
Sus	947,34	947,34	Mpa
Sys	710,15	710,10	Mpa
Sew	310,00	310,00	Mpa
Ses	185,32	185,30	Mpa
τ_{min}	157,17	157,70	Mpa
Nfs	1,52	1,51	-
Nfs>1	Aprovado	Aprovado	-
C1	6	6	-
Kb	1,14	1,14	-
σ_a	164,64	164,87	Mpa
σ_m	508,57	509,00	Mpa
σ_{min}	343,94	344,00	Mpa
Se	321,19	321,00	Mpa
Nfb	1,21	1,20	-
Nfb>1	Aprovado	Aprovado	-
R2	12,00	12,00	mm
Kw2	1,15	1,15	-
τ_{Ba}	80,11	80,11	Mpa
τ_{Bm}	247,47	247,47	Mpa
τ_{Bmin}	167,36	167,36	Mpa
Nfs	1,59	1,59	-
Nfs>1	Aprovado	Aprovado	-
K	11,49	11,49	N/mm
Na	16,28	16,28	-
Na real	17	17,00	-
K real	11	11,00	N/mm
Nt	18	18,00	-
Lb	72	72,00	mm
De	28	28,00	mm
Di	20	20,00	mm
Lf	112	112,00	mm
Ymax	16,13	16,16	mm
Wt	0,28	0,28	kg
Tempo	91	0,72	min

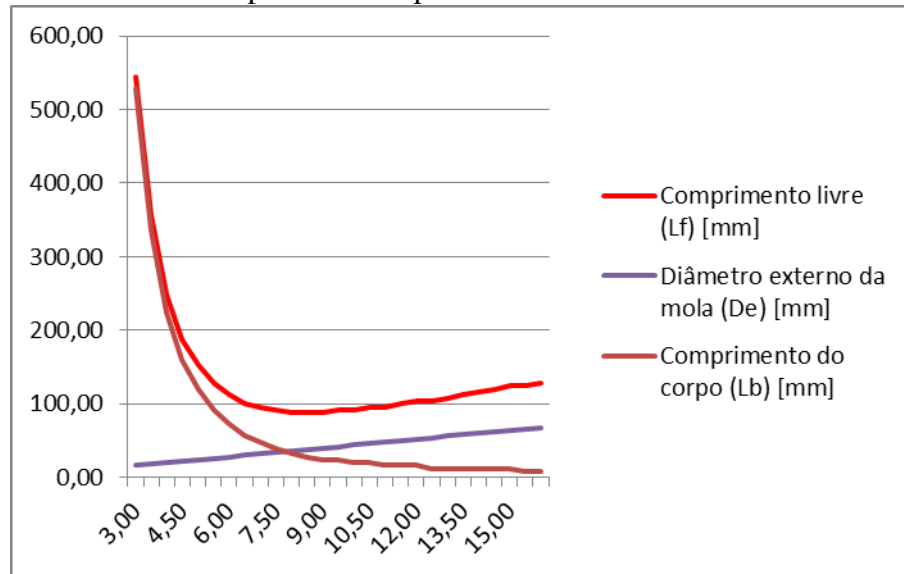
Fonte: autor

Dos resultados do estudo de caso mostrados na tabela 6, verifica-se que os valores não são iguais, porém são bem próximos, o que valida o programa. Além disso, é notável a diferença do tempo utilizado em cada um dos projetos, sendo que no processo manual apenas uma mola foi projetada em 91 minutos, enquanto no programa, 27 molas foram projetadas em 43 segundos. Com isso, é possível afirmar que o intuito do trabalho foi atingido, pois o usuário terá à disposição diversos projetos de mola em um tempo notavelmente reduzido.

Caso nenhum dos projetos seja aprovado ou caso as molas aprovadas não satisfaçam o usuário, ele pode rapidamente alterar qualquer parâmetro na tela de inputs para obter novas molas. Geralmente, altera-se o diâmetro do fio, pois é o parâmetro mais simples de ser

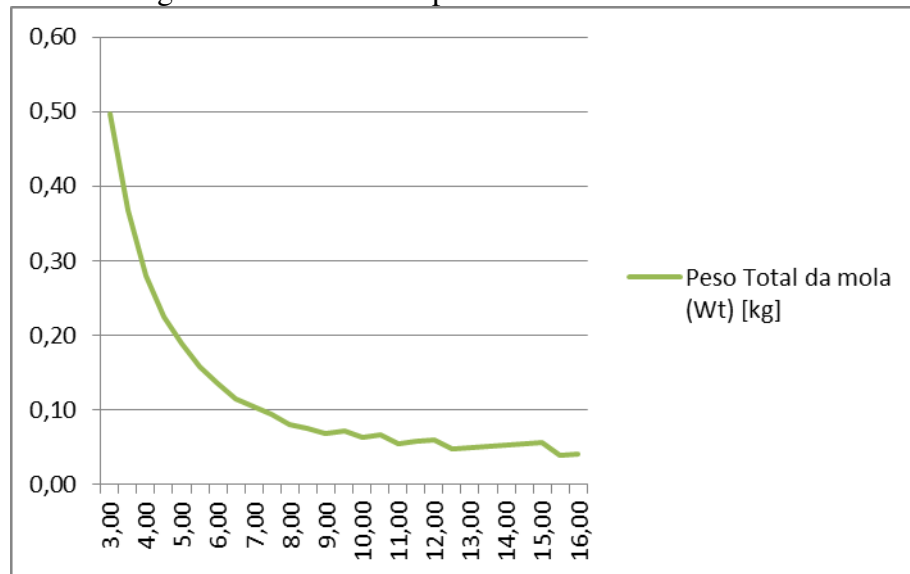
alterado. Outro fator que alterado possibilitaria um projeto completamente diferente seria o material da mola. Abaixo, os gráficos do estudo de caso.

Figura 25 – Gráfico dos parâmetros operacionais e construtivos do estudo de caso.



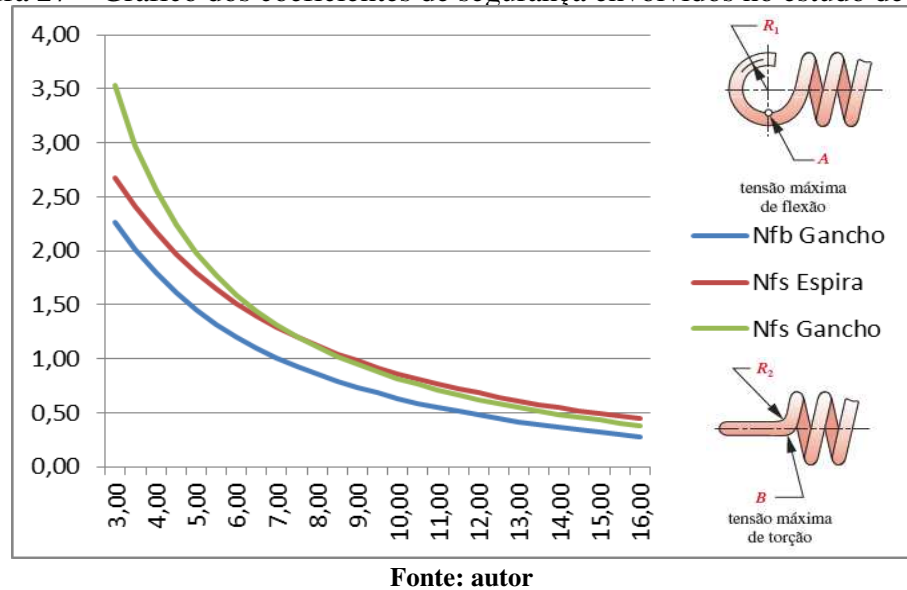
Fonte: autor

Figura 26 – Gráfico do peso total do estudo de caso.



Fonte: autor

Figura 27 – Gráfico dos coeficientes de segurança envolvidos no estudo de caso.

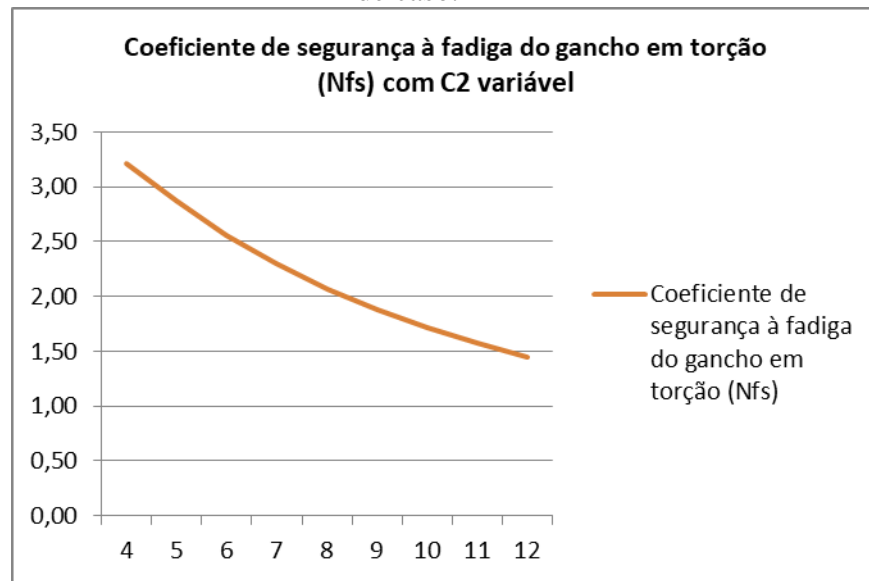


Na figura 25 se observa que quanto maior o índice da mola, menor o seu peso total. A mesma redução se observa para o comprimento do seu corpo. O peso do componente é fator determinante em diversas aplicações, como por exemplo na indústria aeronáutica, onde se busca o menor peso possível da aeronave, para otimizar sua autonomia. Com isso, é possível afirmar que o índice C deve ser o maior possível, porém sem comprometer a segurança. Dos gráficos do estudo de caso, para ter o menor peso possível sem comprometer a segurança, deve ser selecionada mola de índice C entre 5 e 6. Este índice traria uma mola com peso total entre 0,18 e 0,13 kg.

O comprimento livre volta a aumentar em torno de $C = 8$. O diâmetro externo segue uma proporção linear, aumentando de forma diretamente proporcional com o índice C , o que é esperado, pois C é um fator determinante para os diâmetros da mola. Do estudo de caso, $C = 8$ traria resultados inferiores a 1 para um dos parâmetros de segurança.

Na figura 25 é possível observar que os coeficientes de segurança reduzem de valor conforme o índice C aumenta. Portanto molas com o índice C menor são mais seguras, mas com maiores dificuldades de fabricação e custo mais elevado. Desta forma, o usuário deverá verificar o que ele realmente espera de seu projeto e procurar a melhor opção entre as molas aprovadas. Para o estudo de caso, apenas três molas passaram pelos quatro fatores, com o índice C entre 5,50 e 6,50. Foi escolhido $C = 6$ por ser um valor intermediário entre os aprovados.

Figura 28 – Gráfico do coeficiente de segurança à fadiga do gancho em torção do estudo de caso.



Fonte: autor

Os ganchos se mostraram seguros à fadiga em torção para qualquer C2. Com isso, é possível que se eleve o fator de C2 para 12, se o usuário assim desejar, para que tenha um menor custo para as extremidades, para o estudo de caso.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho poderá aperfeiçoar o ofício de engenheiros e o processo de aprendizagem de estudantes e demais pessoas interessadas no assunto, uma vez que o tempo necessário para o projeto de molas foi significativamente reduzido. Além disso, o programa desenvolvido para esta finalidade traz não só uma, mas vinte e sete projetos de mola, alcançando a possibilidade de escolha, entre uma gama de opções, a melhor para atender a necessidade presente. Não obstante ao exposto, com tantas etapas envolvidas no processo de cálculo e seleção de valores, impede enganos ou seleções errôneas dos parâmetros envolvidos, o que poderia prejudicar o restante do projeto ou obrigar o realizador da tarefa a fazer uma nova seleção e repetir todas as etapas que já haviam sido feitas.

Ademais, o programa desenvolvido tem travas de seleção dos parâmetros e comentários que auxiliam o usuário em cada um dos campos que devem ser preenchidos para execução do projeto. As telas que são exibidas ao utente são apenas aquelas estritamente necessárias para a utilização do programa e a seção de resultados mostra apenas as molas que foram aprovadas em todos os parâmetros, os dados necessários para seleção e construção, assim como os gráficos que auxiliam a identificar pontos que podem ser alterados sem prejudicar o projeto. O programa também foi pensado para depender minimamente de interações manuais, tendo boa parte dos seus cálculos feitos automaticamente. Com isto, conclui-se que o programa minimiza erros, algo que foi proposto no objetivo deste trabalho.

Do estudo de caso, verifica-se que tanto o processo manual como o processo do programa trazem resultados similares. Portanto, a confiabilidade dos cálculos é alta e os valores e gráficos obtidos são satisfatórios para qualquer que seja a aplicação do utente.

Após a execução do programa e com todas as molas aprovadas na tela, o usuário deve verificar, para sua aplicação, qual resultado deseja obter. Dos gráficos é possível analisar que para um índice C menor, os coeficientes de segurança são maiores. Com isso, se o requisito do seu projeto é apenas segurança, a mola com o menor C deve ser escolhida. Porém, o menor índice implica no maior custo para compra e maior dificuldade na fabricação da mola. O utente deve balancear todos os fatores para assim determinar qual opção lhe seria de melhor utilização. Um ponto de melhoria para futuros trabalhos que possam vir a ser desenvolvidos seria a inclusão no programa de bancos de dados com molas de catálogos dos fabricantes reais a partir dos cálculos do projeto e também o custo médio deste tipo de elemento de máquinas, para que se tenha assim um novo fator para determinar a sua seleção.

REFERÊNCIAS

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4.ed. Porto Alegre: Bookman. 2013.

BUDYNAS, R. G. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 8.ed. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA. 2011.

DREUX, Azevedo M.A.; **F. U. B. Macros para Excel na prática**. Elsevier Editora. 1ed, 2009.

LOUREIRO, H. **Excel 2007, Macros e VBA**, FCA, Lisboa, 2007.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CINTO, A. F.; GÓES, **W. M. Excel Avançado**. Novatec Editora, 1ed, p. 11, 2008.

CALLISTER JR., W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. LTC Editora. 702p. 2006.

SOUSA, N. M. **Projeto estrutural de molas helicoidais de compressão utilizando o programa Microsoft Excel**. 2017. 63 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

SILVA, R. B. **Estudo do comportamento mecânico de molas helicoidais de compressão**. 2016. 62 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

APÊNDICE A – Linhas de código do Excel utilizadas no programa

Neste apêndice estão demonstradas todas as linhas de código necessárias para a execução do programa, visando facilitar seu entendimento e reprodução. Todas as fórmulas serão representadas através da coluna B das abas de cálculo dos parâmetros da mola (aba Plan6) e dos parâmetros variando o índice do gancho da mola (aba Plan3).

No Excel, o caractere “*” é para multiplicação, o “^” é para expoentes e o sinal “=” é utilizado em todas as linhas de comando, pois indica que o que está sendo inserido é um comando, e não um texto.

A.1

Diâmetro médio da espira (D), em mm.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=B1*INPUT!\$B\$10

- B1 é o índice C da mola.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.

A.2

Tensão inicial de espira (τ_i 1), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=(-4,231*B1^3+181,5*B1^2-3387*B1+28640)*0,00689476

- B1 é o índice C da mola.

A.3

Tensão inicial de espira (τ_i 2), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=(-2,987*B1^3+139,7*B1^2-3427*B1+38404)*0,00689476

- B1 é o índice C da mola.

A.4

Tensão inicial de espira (τ_i), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(B3+B4)/2$$

- B3 é a Tensão inicial de espira (τ_i 1), em MPa.
- B4 é a Tensão inicial de espira (τ_i 2), em MPa.

A.5

Fator de Cisalhamento Direto (K_s).

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=1+(0,5/B1)$$

- B1 é o índice C da mola.

A.6

Força de tração inicial na espira (F_i), em Newtons.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=((PI()*INPUT!$B$10^3*B5)/(8*B6*B2))$$

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- B5 é a tensão inicial de espira (τ_i), em MPa.
- B6 é o fator de Cisalhamento Direto (K_s).
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.7

Esta linha de comando verifica se $F_i < F_{\min}$. Ou seja, verifica se a força mínima de projeto supera a força de fabricação da mola.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=SE(B7<INPUT!$B$5;"APROVADO";"REPROVADO")$$

- B7 é a força de tração inicial na espira (F_i), em Newtons.
- INPUT!\$B\$5 é a força mínima ($F_{\min}$) de projeto, em Newtons.

A.8

Força média de projeto (F_m), em Newtons.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(\text{INPUT!}\$B\$5+\text{INPUT!}\$B\$6)/2$$

- INPUT!\$B\$5 é a força mínima ($F_{\min}$) de projeto, em Newtons.
- INPUT!\$B\$6 é a força máxima ($F_{\max}$) de projeto, em Newtons.

A.9

Força alternada de projeto (F_a), em Newtons.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(\text{INPUT!}\$B\$6-\text{INPUT!}\$B\$5)/2$$

- INPUT!\$B\$5 é a força mínima ($F_{\min}$) de projeto, em Newtons.
- INPUT!\$B\$6 é a força máxima ($F_{\max}$) de projeto, em Newtons.

A.10

Tensão de cisalhamento médio (τ_{med}), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(8*B9*B6*B2)/(PI()*\text{INPUT!}\$B\$10^3)$$

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- B6 é o fator de cisalhamento direto (K_s).
- B9 é a força média de projeto (F_m), em Newtons.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola, em mm.
- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.11

Fator de Wahl (K_w).

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=((4*B1-1)/(4*B1-4))+(0,615/B1)$$

- B1 é o índice C da mola.

A.12

Tensão de cisalhamento alternada (τ_a), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(8*B12*B10*B2)/(PI()*\text{INPUT!}\$B\$10^3)$$

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- B10 é a força alternada de projeto (F_a), em Newtons.
- B12 é o fator de Wahl (K_w).
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.13

Tensão de cisalhamento mínima ($\tau_{\min}$), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

= $(8*B2*B6*INPUT!$B$5)/(PI()*INPUT!$B$10^3)$

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- B6 é o fator de cisalhamento direto (K_s).
- INPUT!\$B\$5 é a força mínima ($F_{\min}$) de projeto, em Newtons.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.14

Limite de resistência à tração do fio (S_{ut}), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=PROCV(Material;BD!\$Q\$1:\$S\$6;3;0)*INPUT!\$B\$10^PROCV(Material;BD!\$Q\$1:\$S\$6;2;0)

O comando PROCV é utilizado para, à partir de um dado de entrada que no caso da linha de comando em questão é o material da mola, se busque um outro parâmetro correspondente em um banco de dados ou tabela.

- PROCV(Material;BD!\$Q\$1:\$S\$6;3;0) traz o valor da constante A para o material da mola correspondente.
- PROCV(Material;BD!\$Q\$1:\$S\$6;2;0) traz o valor da constante b para o material da mola correspondente.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.

A.15

Limite de resistência ao cisalhamento do fio (S_{us}), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=0,667*B14$$

- B14 é o limite de resistência à tração do fio (S_{ut}), em MPa.

A.16

Limite de resistência ao escoamento sob torção(S_{ys}), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=B14*PROCV(\text{Material};BD!\$Y\$3:\$Z\$8;2;0)$$

O comando PROCV é utilizado para, à partir de um dado de entrada que no caso da linha de comando em questão é o material da mola, se busque um outro parâmetro correspondente em um banco de dados ou tabela.

- PROCV(Material;BD!\\$Y\\$3:\\$Z\\$8;2;0) traz o percentual máximo do limite de resistência à tração para o corpo em torção.
- B14 é o limite de resistência à tração do fio (S_{ut}), em MPa.

A.17

Limite de resistência à fadiga em condições alternadas (S_{es}), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(0,5*B17*B15)/(B15-0,5*B17)$$

- B15 é o limite de resistência ao cisalhamento do fio (S_{us}), em MPa.
- B17 é limite de duração do fio de molas não-jateadas (S_{ew}), em MPa.

A.18

Coeficiente de segurança para espiras em torção (N_{fs}).

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(B18*(B15-B19))/(B18*(B11-B19)+B15*B13)$$

- B11 é a tensão de cisalhamento média (τ_{med}), em MPa.
- B13 é a tensão de cisalhamento alternada (τ_a), em MPa.
- B15 é o limite de resistência ao cisalhamento do fio (S_{us}), em MPa.
- B18 é o limite de resistência à fadiga em condições alternadas (S_{es}), em MPa.
- B19 é a tensão de cisalhamento mínima (τ_{min}), em MPa.

A.19

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

Esta linha de comando verifica se o fator de segurança para as espiras em torção (N_{fs}) é maior ou igual a 1. Em caso positivo, retorna mensagem de aprovado. Em caso negativo, retorna mensagem de reprovado.

=SE(B20>=1;"APROVADO";"REPROVADO")

A.20

Índice C1 do gancho.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=B2/INPUT!\$B\$10

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.

A.21

Fator K_b , que é o fator K para o gancho sob torção.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=(4*B22^2-B22-1)/(4*B22*(B22-1))

- B22 é o índice C1 do gancho.

A.22

Tensão alternada devido a flexão no gancho (σ_a), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=((B23*16*B2*B10)/(PI()*INPUT!\$B\$10^3))+((4*B10)/(PI()*INPUT!\$B\$10^2))

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- B10 é a força alternada de projeto (F_a), em Newtons.
- B23 é o fator K para o gancho sob torção (K_b).
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.23

Tensão média devido a flexão no gancho (σ_m), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=((B23*16*B2*B9)/(PI()*INPUT!\$B\$10^3))+((4*B9)/(PI()*INPUT!\$B\$10^2))$$

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- B9 é a força média de projeto (F_m), em Newtons.
- B23 é o fator K para o ganho sob torção (K_b).
- INPUT!\\$B\\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.24

Tensão mínima devido a flexão no gancho ($\sigma_{\min}$), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=((B23*16*B2*INPUT!\$B\$5)/(PI()*INPUT!\$B\$10^3))+((4*INPUT!\$B\$5)/(PI()*INPUT!\$B\$10^2))$$

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- B23 é o fator K para o ganho sob torção (K_b).
- INPUT!\\$B\\$5 é a força mínima ($F_{\min}$) de projeto, em Newtons.
- INPUT!\\$B\\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.

A.25

Conversão da resistência de endurance torcional em 1 resistência de endurance por tração (S_e), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=B18/0,577$$

- B18 é o limite de resistência à fadiga em condições alternadas (S_{es}), em MPa.

A.26

Coeficiente de segurança à fadiga para o gancho em flexão (N_{fb}).

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(B27*(B14-B26))/(B27*(B25-B26)+B24*B14)$$

- B14 é o limite de resistência à tração do fio (S_{ut}), em MPa.
- B24 é tensão alternada devido a flexão no gancho (σ_a), em MPa.
- B25 é a tensão média devido a flexão no gancho (σ_m), em MPa.

- B26 é a tensão mínima devido a flexão no gancho ($\sigma_{\min}$), em MPa.
- B27 é a conversão da resistência de endurance torcional em 1 resistência de endurance por tração (S_e), em MPa.

A.27

Esta linha de comando verifica se o fator de segurança para os ganchos em flexão (N_{fb}) é maior ou igual a 1. Em caso positivo, retorna mensagem de aprovado. Em caso negativo, retorna mensagem de reprovado.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=SE(B28>=1;"APROVADO";"REPROVADO")

A.28

Raio do lado flexionado do gancho (R2).

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=(INPUT!\$B\$11*INPUT!\$B\$10)/2

- INPUT!\$B\$11 é o índice C2 do gancho.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.

A.29

Fator de Wahl para o gancho (K_{w2}).

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=(4*INPUT!\$B\$11-1)/(4*INPUT!\$B\$11-4)

- INPUT!\$B\$11 é o índice C2 do gancho.

A.30

Tensão de torção alternada no gancho (τ_{Ba}), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=(8*B31*B2*B10)/(PI()*INPUT!\$B\$10^3)

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- B10 é a força alternada de projeto (F_a), em Newtons.
- B31 é o fator de Wahl para o gancho (K_{w2}).

- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.31

Tensão de torção média no gancho (τ_{Bm}), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(8*B31*B2*B9)/(PI()*INPUT!$B$10^3)$$

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- B9 é a força média de projeto (F_m), em Newtons.
- B31 é o fator de Wahl para o gancho (K_{w2}).
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.32

Tensão de torção mínima no gancho (τ_{Bmin}), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(8*B31*B2*INPUT!$B$5)/(PI()*INPUT!$B$10^3)$$

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- B31 é o fator de Wahl para o gancho (K_{w2}).
- INPUT!\$B\$5 é a força mínima (F_{min}) de projeto, em Newtons.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.33

Coefficiente de segurança à fadiga do gancho em torção (N_{fs}).

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(B18*(B15-B34))/(B18*(B33-B34)+B15*B32)$$

- B15 é o limite de resistência ao cisalhamento do fio (S_{us}), em MPa.
- B18 é o limite de resistência à fadiga em condições alternadas (S_{es}), em MPa.
- B32 é a tensão de torção alternada no gancho (τ_{Ba}), em MPa.
- B33 é a tensão de torção média no gancho (τ_{Bm}), em MPa.
- B34 é a tensão de torção mínima no gancho (τ_{Bmin}), em MPa.

A.34

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

Esta linha de comando verifica se o fator de segurança para os ganchos em torção (N_{fs}) é maior ou igual a 1. Em caso positivo, retorna mensagem de aprovado. Em caso negativo, retorna mensagem de reprovado.

=SE(B35>=1;"APROVADO";"REPROVADO")

A.35

Constante da mola (K), em N/mm.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=(INPUT!\$B\$6-INPUT!\$B\$5)/INPUT!\$B\$12

- INPUT!\$B\$6 é a força máxima ($F_{\max}$) de projeto, em Newtons.
- INPUT!\$B\$5 é a força mínima ($F_{\min}$) de projeto, em Newtons.
- INPUT!\$B\$12 é deflexão dinâmica da mola (y), em mm.

A.36

Números de espiras ativas (N_a).

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

O comando PROCV é utilizado para, à partir de um dado de entrada que no caso da linha de comando em questão é o material da mola, se busque um outro parâmetro correspondente em um banco de dados ou tabela.

=(INPUT!\$B\$10^4*PROCV(Material;BD!\$Q\$1:\$V\$6;5;0))/(8*B2^3*B37)

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- B37 é Constante da mola (K), em N/mm.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PROCV(Material;BD!\$Q\$1:\$V\$6;5;0) traz o módulo de rigidez do material (G), em MPa.

A.37

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

Esta linha de comando traz o número real de espiras ativas, pois ela traz o resultado da equação de cálculo das espiras ativas arredondado para cima, ou seja, um número redondo, possível de ser fabricado.

=ARREDONDAR.PARA.CIMA(B38;0)

A.38

Constante K real da mola, em N/mm.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=(INPUT!\$B\$10^4*PROCV(Material;BD!\$Q\$1:\$V\$6;5;0))/(8*B2^3*B39)

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- B39 é o número de espiras ativas real.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PROCV(Material;BD!\$Q\$1:\$V\$6;5;0) é

A.39

Número de espiras totais (N_t).

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=B39+1

- B39 é o número de espiras ativas real.

A.40

Comprimento do corpo da mola (L_p), em mm.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=B41*INPUT!\$B\$10

- B41 é o número de espiras totais (N_t).
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.

A.41

Diâmetro externo da mola (De), em mm.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

=B2+INPUT!\$B\$10

- B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.

- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.

A.42

Diâmetro interno da mola (D_i), em mm.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=B43-2*INPUT!B10$$

- B43 é o diâmetro externo da mola (D_e), em mm.
- INPUT!\$B\$10 o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.

A.43

Comprimento livre da mola (L_f), em mm.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=B42+2*B44$$

- B42 é o comprimento do corpo da mola (L_b), em mm.
- B44 é o diâmetro interno da mola (D_i), em mm.

A.44

Deflexão para alcançar a maior das 2 forças especificadas ($Y_{\max}$), em mm.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(INPUT!$B$6-B7)/B40$$

- B7 é a força de tração inicial na espira (F_i), em Newtons.
- B40 é a constante K real da mola, em N/mm.
- INPUT!\$B\$6 é a força máxima ($F_{\max}$) de projeto, em Newtons.

A.45

Peso total da mola (W_t), em kg.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros da mola (aba Plan6).

$$=(((PI())^2*(INPUT!$B$10/1000)^2*(Plan6!B2/1000)*Plan6!B41*7938)/4)$$

- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- B2 é o diâmetro média da espira (D), em mm.
- B41 é o número de espiras totais (N_t).

- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.46

Raio do lado flexionado do gancho (R_2), em mm.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros variando o índice C do gancho(C2) (aba Plan3).

$$=(B1*INPUT!\$B\$10)/2$$

- B1 é o índice C2 do gancho.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.

A.47

Fator de Wahl para o gancho (K_{w2}).

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros variando o índice C do gancho(C2) (aba Plan3).

$$=(4*B1-1)/(4*B1-4)$$

- B1 é o índice C2 do gancho.

A.48

Diâmetro médio da espira (D), em mm.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros variando o índice C do gancho(C2) (aba Plan3).

$$=Plan6!B2$$

- Plan6!B2 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.

A.49

Tensão de torção alternada no gancho (τ_{Ba}), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros variando o índice C do gancho(C2) (aba Plan3).

$$=(8*B3*B4*Plan6!B10)/(PI()*INPUT!\$B\$10^3)$$

- B3 é o fator de Wahl para o gancho (K_{w2}).
- B4 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- Plan6!B10 é a força alternada de projeto (F_a), em Newtons.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.50

Tensão de torção média no gancho (τ_{Bm}), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros variando o índice C do gancho(C2) (aba Plan3).

$$=(8*B3*B4*Plan6!B9)/(PI()*INPUT!$B$10^3)$$

- B3 é o fator de Wahl para o gancho (K_{w2}).
- B4 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- Plan6!B9 é a força média de projeto (F_m), em Newtons.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.51

Tensão de torção mínima no gancho (τ_{Bmin}), em MPa.

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros variando o índice C do gancho(C2) (aba Plan3).

$$=(8*B3*B4*INPUT!$B$5)/(PI()*INPUT!$B$10^3)$$

- B3 é o fator de Wahl para o gancho (K_{w2}).
- B4 é o diâmetro médio da espira (D), em mm.
- INPUT!\$B\$5 é a força mínima (F_{min}) de projeto, em Newtons.
- INPUT!\$B\$10 é o diâmetro inicial de fio da mola (d), em mm.
- PI() é a fórmula no Excel para o número pi.

A.52

Coefficiente de segurança à fadiga do gancho em torção (N_{fs}).

Linha de comando do Excel aplicada na aba de cálculos dos parâmetros variando o índice C do gancho(C2) (aba Plan3).

$$=(Plan6!B18*(Plan6!B15-B7))/(Plan6!B18*(B6-B7)+Plan6!B15*B5)$$

- B5 é a Tensão de torção alternada no gancho (τ_{Ba}), em MPa.
- B6 é a tensão de torção média no gancho (τ_{Bm}), em MPa.
- B7 é a tensão de torção mínima no gancho (τ_{Bmin}), em MPa.
- Plan6!B18 é o limite de resistência à fadiga em condições alternadas (S_{es}), em MPa.
- Plan6!B15 é o limite de resistência ao cisalhamento do fio (S_{us}), em MPa.

APÊNDICE B – Linhas de código do VBA utilizadas no programa

B.1

//Esta linha de código é utilizada na tela de início, e executada após o usuário selecionar a imagem no centro da tela. Ela seleciona a tela onde o usuário insere os dados.

```
Sheets("INPUT").Select
```

B.2

Este bloco de programação é iniciado após o usuário clicar no botão de execução na tela de inserção dos dados. Aqui, é realizada a verificação se todos os quatro coeficientes de segurança de uma mesma coluna são maiores que 1. Em caso positivo, a coluna é movida para a tela de resultados. Em caso negativo em qualquer um dos parâmetros, o código avança para a próxima coluna e reinicia o processo de verificação. No final, caso nenhuma mola seja aprovada, uma caixa de mensagem é exibida para o usuário, solicitando que os dados inseridos sejam verificados. Se houver uma ou mais molas aprovadas, uma caixa de mensagem é exibida, informando que as molas foram aprovadas com sucesso.

```
Public Sub molasAprovadas()
```

```
//declaração de variáveis
```

```
Dim coluna As Integer
coluna = 2
Dim reprovado As Integer
reprovado = 0
Dim textoMsg As String
textoMsg = ""
Dim colunaColar As Integer
colunaColar = 1
```

```
//limpeza da tela de resultados.
```

```
Sheets("resultado").Select
Range("A1").Select

Columns("A:A").Select
Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
Selection.EntireColumn.Hidden = False
Rows("1:1").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.EntireRow.Hidden = False

Columns("C:C").Select
Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft
```

```
//Neste bloco, se inicia a verificação da aprovação ou não dos parâmetros.
```

```

Do While Sheets("Plan6").Cells(1, coluna).Value <> ""

    If Sheets("Plan6").Cells(8, coluna).Value = "APROVADO" Then
        reprovado = reprovado + 1
    End If

    If Sheets("Plan6").Cells(21, coluna).Value = "APROVADO" Then
        reprovado = reprovado + 1
    End If

    If Sheets("Plan6").Cells(29, coluna).Value = "APROVADO" Then
        reprovado = reprovado + 1
    End If

    If Sheets("Plan6").Cells(36, coluna).Value = "APROVADO" Then
        reprovado = reprovado + 1
    End If

    If reprovado = 4 Then
        Dim ws As Worksheet
        Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("Plan6")
        ws.Activate
        ws.Columns(coluna).Copy

        Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("resultado")
        ws.Activate
        Range("A1").Select
        Selection.End(xlToRight).Select
        ActiveCell.Offset(0, 1).Range("A1").Select
        ActiveSheet.Paste

        colunaColar = colunaColar + 1

    End If

    reprovado = 0

    coluna = coluna + 1

Loop

coluna = 0
colunaColar = 0

If Sheets("resultado").Cells(1, "C").Value = "" Then

    MsgBox ("Molas reprovadas. Verifique os parâmetros inseridos.")

Else

```

MsgBox ("Molas aprovadas.")

B.3

//Este bloco ajusta a tela de resultados, para mostrar apenas os parâmetros de interesse ao usuário final, removendo assim linhas de cálculo indesejadas ou desnecessárias para especificação ou fabricação da mola.

```

Rows("3:5").Select
    Selection.EntireRow.Hidden = True
Rows("6:6").Select
    Selection.EntireRow.Hidden = True
Rows("9:19").Select
    Selection.EntireRow.Hidden = True
Rows("23:27").Select
    Selection.EntireRow.Hidden = True
Range("C30").Select
Application.DisplayFormulaBar = True
Application.DisplayFormulaBar = False
Rows("31:34").Select
    Selection.EntireRow.Hidden = True
Rows("37:37").Select
    Selection.EntireRow.Hidden = True
Rows("38:38").Select
    Selection.EntireRow.Hidden = True
Columns("B:B").Select
    Selection.EntireColumn.Hidden = True

    Range("C1").Select
Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlMedium
End With
With Selection.Borders(xlEdgeTop)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlMedium
End With
With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlMedium

```

```
End With
With Selection.Borders(xlEdgeRight)
    .LineStyle = xlContinuous
    .ColorIndex = 0
    .TintAndShade = 0
    .Weight = xlMedium
End With
```