

NATHAN MAJOR DE SOUSA

**PROJETO ESTRUTURAL DE MOLAS HELICOIDAIS DE COMPRESSÃO
UTILIZANDO O PROGRAMA MICROSOFT EXCEL**

NATHAN MAJOR DE SOUSA

**PROJETO ESTRUTURAL DE MOLAS HELICOIDAIS DE COMPRESSÃO
UTILIZANDO O PROGRAMA MICROSOFT EXCEL**

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 (a): Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá - SP
2017

S725p Sousa, Nathan Major de
Projeto estrutural de molas helicoidais de compressão utilizando o
programa Microsoft Excel / Nathan Major de Sousa – Guaratinguetá,
2017.
61 f : il.
Bibliografia: f. 15-23

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Molas (Mecanismo). 2. Máquinas. 3. Excel for Windows
(Programa de computador) I. Título

CDU 62-272


Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8 3595

NATHAN MAJOR DE SOUSA

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

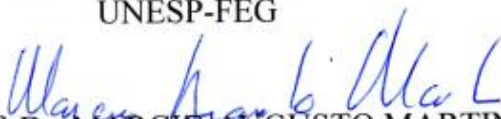
BANCA EXAMINADORA:



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



Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI
UNESP-FEG



Prof. Dr. MARCIO AUGUSTO MARTIN
UNESP-FEG

Novembro de 2017

dedico este trabalho de modo especial, à minha namorada, que me apoiou imensa e incondicionalmente desde o início e com sua experiência e vivência me ajudou no que foi de seu alcance.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais Márcia Major e Paulo Roberto, que sempre acreditaram em meu potencial e nunca mediram esforços para me ajudar,

ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva que além do incentivo também se mostrou prestativo e atencioso. Sua orientação foi fundamental para a confecção desse trabalho,

aos meus amigos da República Só Capim Canela pela amizade sincera e pelos momentos únicos que estarão sempre em minhas memórias,

à todos os professores que tive em meus anos de graduação que com muita paciência e sabedoria me guiaram por essa jornada,

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

RESUMO

A finalidade do trabalho é fazer o projeto de uma mola de compressão que trabalhará sobre fadiga e tem como objetivo principal servir como material de apoio aos alunos de graduação. O projeto fará uso da linguagem de programação Excel\VBA, onde após o usuário inserir alguns dados de entradas ele receberá dados importantes das molas aprovadas como peso, coeficiente de segurança para fadiga e principais fatores geométricos, além de gráficos para melhor compreensão e análise. O programa respeita algumas limitações impostas pela literatura técnica e o usuário será advertido quando cometer algum equívoco, garantindo assim a fidelidade dos resultados. Muitas das vezes mais de uma mola será aprovada, então sugestões serão dadas para a escolha da mola ideal, porém o usuário deve estar atento as necessidades do seu projeto. Por ser similar aos exercícios feito em sala de aula e usar uma ferramenta já conhecida dos alunos, o material se mostra de grande interesse para os mesmos. Como objetivo secundário o programa pode ser melhorado para uso de fabricantes e vendedores de mola.

PALAVRAS-CHAVE: Projeto. Mola Helicoidal de Compressão. Excel. Material de apoio. Elemento de máquina.

ABSTRACT

The purpose of the work is to design a compression spring that will work on fatigue and its main purpose is to serve as a support material for undergraduates. The project will use the Excel \ VBA programming language, where after inserting some input data the user will receive important data from approved springs such as weight, fatigue safety coefficient and main geometric factors, as well as graphs for better understanding and analysis. The program respects some limitations imposed by the technical literature and the user will be warned when to make some mistake, guaranteeing the fidelity of the results. Often more than one spring will be approved, then suggestions will be given for the choice of the ideal spring, however the user should be aware of the needs of your project. Because it is similar to the exercises done in the classroom and use a tool already known to the students, the material is of great interest to them. As a secondary objective the program can be improved for use by spring manufacturers and vendors.

KEYWORDS: Project. Helical Compression spring. Excel. Support material. Machine elements.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Resistências mínimas sob tração de fios de mola	17
Figura 2 – Diagrama de Goodman modificado	26
Figura 3 – Extremidades simples	27
Figura 4 – Extremidades simples e esmerilhadas	27
Figura 5 – Extremidades esquadrejadas	28
Figura 6 – Extremidades esquadrejadas e esmerilhadas.....	28
Figura 7 – Comprimento montado	31
Figura 8 – Comprimento fechado.....	31
Figura 9 – Comprimento mínimo de trabalho	32
Figura 10 – Comprimento livre	33
Figura 11 – Curvas de condições críticas de flambagem	35
Figura 12 – Gráfico de comportamento do peso e comprimento livre.....	45
Figura 13 – Gráfico de comportamento dos diâmetros e folgas.....	46
Figura 14 – Gráfico de comportamento dos coeficientes de segurança	47
Figura 15 – Interface com o usuário	48
Figura 16 – Estudo de caso (I).....	54
Figura 17 – Mensagens de erros	54
Figura 18 – Estudo de caso (II)	55
Figura 19 – Gráficos do estudo de caso.....	56
Figura 20 – Estudo de caso (III)	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetros preferenciais de fio	19
Tabela 2 – Coeficientes e expoentes para a equação (1)	20
Tabela 3 – Resistência de escoamento torcional máxima S_{ys}	24
Tabela 4 – Tabela com dados fornecidos pelo usuário.....	38
Tabela 5 – Tabela de cálculo geral da mola	40
Tabela 6 – Continuação da tabela de cálculo geral da mola.....	42
Tabela 7 – Resumo dos resultados	45
Tabela 8 – Tabelas das molas aprovadas.....	49
Tabela 9 – Constantes utilizadas	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

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

LISTA DE SÍMBOLOS

S_{ut}	resistência de tração
S_{us}	resistência de cisalhamento
d	diâmetro de fio
D	diâmetro médio de espira
L_f	comprimento livre
N_t	número de espiras
L_s	altura fechada
D_o	diâmetro externo
D_i	diâmetro interno
$furo_{min}$	diâmetro de furo mínimo
$pino_{max}$	diâmetro de pino máximo
C	índice de mola
τ	tensão cisalhante
T	torque
r	raio
J	momento polar de inércia
F	força ou carga
A	área
K_s	fator de cisalhamento direto
K_w	fator de Wahl - torção
F_{max}	máxima carga variada
F_{min}	mínima carga variada
F_{alt}	carga alternante
F_{med}	carga média
τ_i	tensão inicial

τ_{med}	tensão média
τ_a	tensão de cisalhamento alternada
S_{ys}	resistência de escoamento torcional
S_{sw}	limite de resistência à fadiga torcional para carregamento repetido
S_{es}	limite de resistência à fadiga torcional para carregamento alternado
N_{fs}	coeficiente de segurança para falha por fadiga torcional
k	constante inicial de mola
$y_{trabalho}$	deflexão de trabalho
G	módulo de cisalhamento
N_a	número de espiras ativas
N_a^*	número de espiras ativas ajustado
k^*	constante de mola ajustada
L_a	comprimento montado de mola
$y_{inicial}$	deflexão inicial
L_m	comprimento mínimo de trabalho
y_{interf}	limite de interferência
$y_{fechada}$	deflexão de mola fechada
$F_{fechada}$	força à altura de mola fechada
$\tau_{fechada}$	tensão na altura fechada
$N_{sfechada}$	coeficiente de segurança para altura de mola fechada
y_{max}	máxima deflexão em trabalho
f_n	frequência natural
f	frequência excitante
W_a	peso da mola
γ	densidade em peso da mola
g	gravidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.3	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	CONFIGURAÇÃO DA MOLA.....	17
2.2	CARACTERÍSTICAS DA MOLA	17
2.2.1	Diâmetros preferenciais de fio	18
2.2.2	Resistência do fio da mola	20
2.2.2.1	Resistência à Tração.....	20
2.2.2.2	Resistência ao Cisalhamento.....	20
2.2.2.3	Tensões Residuais	21
2.3	PRINCIPAIS PARÂMETROS DA MOLA HELICOIDAL DE COMPRESSÃO ..	21
2.3.1	Índice de mola e diâmetro médio.....	21
2.4	ANÁLISE DO CARREGAMENTO DA MOLA.....	22
2.5	FATORES DE TENSÃO	22
2.6	TENSÕES ATUANTES	23
2.6.1	Análise do carregamento operacional	23
2.6.2	Tensões	23
2.7	RESISTÊNCIAS DE MOLAS DE COMPRESSÃO	24
2.7.1	Resistência ao escoamento sob torção	24
2.7.2	Limite de resistência à fadiga torcional para carregamento repetido	25
2.7.3	Limite de resistência à fadiga torcional para carregamento alternado	25
2.8	COEFICIENTE DE SEGURANÇA PARA FALHA POR FADIGA TORCIONAL	25
2.9	PROJETO CONSTRUTIVO E OPERACIONAL	26
2.9.1	Detalhes de Extremidades	27
2.9.1.1	Extremidades simples	27
2.9.1.2	Extremidades simples e esmerilhadas	27
2.9.1.3	Extremidades esquadrejadas	28
2.9.1.4	Extremidades esquadrejadas e esmerilhadas.....	28
2.10	CONSTANTE DE MOLA E NÚMERO DE ESPIRAS	29
2.11	COMPRIMENTO DE MOLAS.....	30
2.11.1	Comprimento montado	30
2.11.2	Comprimento fechado	31
2.11.3	Comprimento mínimo de trabalho	32
2.11.4	Comprimento livre	33
2.12	ESTADO DE MOLA FECHADA	33
2.12.1	Força de mola fechada	33
2.13	ANÁLISE DE FALHAS.....	34
2.13.1	Falha por flambagem.....	34
2.13.2	Falha por ressonância	35
2.14	FOLGAS DIAMETRAIS	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38

3.1	TABELAS DE CÁLCULOS.....	38
3.2	GRÁFICOS.....	44
3.3	FORMATAÇÃO CONDICIONAL	47
3.4	INTERFACE COM O USUÁRIO	48
3.4.1	Programação	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Dentro do curso de engenharia mecânica o aluno aprende sobre os elementos que compõem uma máquina. Um engenheiro além de saber quais são e como usar esses elementos também deve ter o conhecimento de como ele foi projetado de forma segura e do porque de cada parâmetro usado.

Dentre os elementos estudados está a mola, elemento muito importante usado para armazenar energia mecânica. Estão presentes desde uma simples lapiseira até em uma máquina de grande porte.

Por definição são objetos que dão impulso ou resistência a outras peças, imprimindo movimentos, amortecendo pancadas, entre outros.

É importante salientar que todas as fórmulas e imagens do trabalho, exceto as fórmulas do Excel e dos gráficos e tabelas gerados pelo próprio autor, foram tiradas de Norton (2004), que é o principal livro-texto dos alunos de graduação para o estudo de projeto de molas.

1.2 OBJETIVOS

O trabalho propõe fazer um programa em Excel\VBA que faça o projeto de uma mola de compressão segura para trabalhar sobre fadiga de acordo com alguns parâmetros iniciais determinados pelo usuário, seja ele um estudante de graduação, um pesquisador, um fabricante de mola ou apenas um entusiasta do assunto.

O objetivo principal desse programa é servir como material de apoio para os alunos de engenharia em geral que estejam estudando sobre o assunto. Não é requerido dos graduandos que tenham profundo conhecimento em Excel, já que a interface do programa foi feita para uma rápida e simples conferência de resultados.

É importante frisar que o programa servirá apenas como um material apoio, pois ele apenas lerá os dados de entrada e ao final fornecerá os resultados, o usuário não terá acesso às passagens matemáticas ou constantes empregadas, então é necessário que ele tenha um conhecimento prévio de um projeto de molas, porém mesmo assim o programa avisará o usuário caso ele insira algum valor incoerente. Logo, o programa não prejudicará o ensino dos alunos, pois eles precisarão fazer o projeto da mola no papel, como costumam fazer, e depois

podem usar o programa para conferir seus resultados, fazendo assim, com que eles tenham certeza que aprenderam de forma correta o projeto.

1.3 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Na época em que o autor estudava sobre molas ele sentiu falta de algo que mostrasse se seus exercícios estavam corretos ou se eram os mais apropriados para as necessidades do exercício, pois em grande parte das vezes o livro-texto não fornece resposta. Em muitos exercícios os alunos eram instruídos a adotar alguns parâmetros, que ao decorrer do exercício iam conferindo se estavam adequados. Por esse motivo os livros-texto não fornecem respostas, pois há mais de uma possibilidade de resposta certa, então cabe ao aluno verificar se a resposta dele além de correta também é a mais coerente. O livro-texto e o professor dão algumas dicas do que pode ser um projeto ideal, porém não é uma verdade absoluta.

Com essa experiência o trabalho foi feito no intuito de fazer com que o aluno consiga visualizar todas essas possibilidades de resposta certa, e também dá algumas ferramentas a mais como resultado para que ele consiga com mais facilidade chegar ao resultado ideal. Com isso o aluno terá a experiência completa de um projeto de mola de compressão à fadiga.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho tem cinco capítulos, onde a presente seção faz parte do capítulo 1, onde é apresentado de uma forma mais geral o tema do trabalho com uma breve introdução, os objetivos a serem alcançados e quais foram as motivações para o mesmo.

O capítulo 2 traz todo o embasamento teórico que foi necessário para a confecção do trabalho, como também todas as constantes e considerações adotadas pelo autor. Traz também toda a formulação necessária para o projeto que mais tarde será passada para o Excel.

O capítulo 3 é uma análise dos materiais e dos métodos empregados para poder fazer a programação do projeto. Traz também toda a formatação usada, bem como gráficos que ilustrarão os resultados obtidos.

O capítulo 4 traz uma discussão sobre os possíveis resultados que o usuário pode encontrar ao decorrer da sua pesquisa no programa, neste capítulo é dado também alguns conselhos a serem seguidos para que se chegue num resultado ideal.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais obtidas pelo autor com o presente trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONFIGURAÇÃO DA MOLA

Para esse trabalho a configuração utilizada será a mola helicoidal de compressão, com passo e constante de mola fixo. O diâmetro de espira será constante e seu fio de seção transversal circular. Essa configuração é a forma mais simples para se projetar uma mola e é o primeiro contato do aluno com molas, é também a forma de mola mais comum e também com maior disponibilidade no mercado.

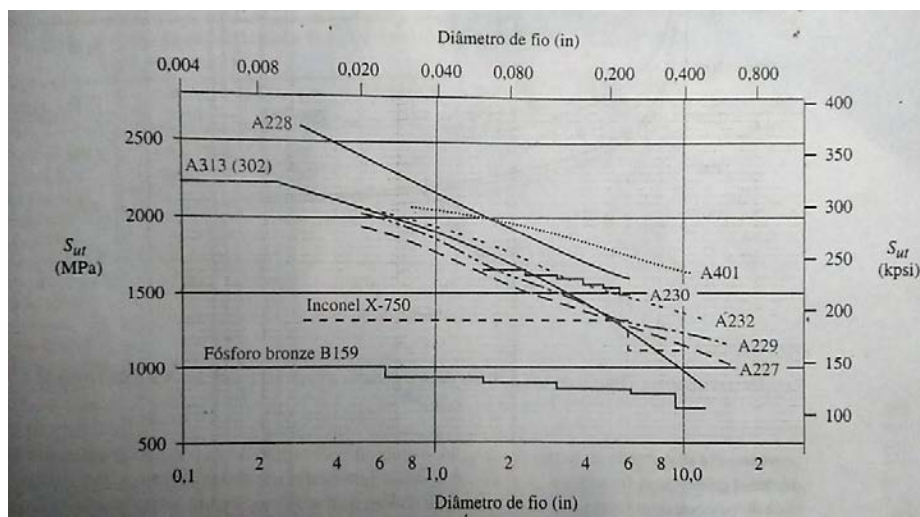
É nesse formato que até as pessoas mais leigas no assunto conhecem uma mola e imaginam seu uso. Então por isso para esse projeto foi escolhido esse formato, como uma forma de introduzir o usuário com algo mais familiar ao projeto de molas.

2.2 CARACTERÍSTICAS DA MOLA

No caso específico desse trabalho as propriedades do material deverão estar relacionadas com seu desempenho em carregamentos dinâmicos, como alta resistência à tração, tenacidade e resistência ao escoamento.

Dentre todos os materiais de fio de mola com maior disponibilidade no mercado o escolhido foi o aço ASTM A228 ou fio musical, devido sua alta resistência à tração dentre todos os fios musicais, especialmente para pequenos diâmetros de fio, como mostra a figura 1.

Figura 1 - Resistências 1mínimas sob tração de fios de mola.



Fonte: Norton (2004)

2.2.1 Diâmetros preferenciais de fio

Devido a grande demanda e uma forma de padronizar a produção de molas, existe uma faixa preferencial de diâmetro de molas na qual são listados os diâmetros mais comuns de arame disponível que são mostrados na Tabela 1, onde está também indicado a faixa preferencial para cada material de arame. É altamente recomendado o uso desses diâmetros para garantir um melhor custo e disponibilidade, porém diâmetros fora desses intervalos também podem ser usados. Por isso nesse trabalho foi criado um aviso para os usuários que tentarem inserir um valor fora dessas especificações, porém nada o impedirá de continuar o projeto se mesmo depois do aviso ele preferir usar o diâmetro de sua preferência. Para o material deste trabalho a faixa recomendada de fio de mola é de aproximadamente 0,1 a 6,5 milímetros.

Tabela 1 - Diâmetros preferenciais de fio.

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

Fonte: Norton (2004)

2.2.2 Resistência do fio da mola

2.2.2.1 Resistência à Tração

A Figura 1 é um gráfico semi-logarítmico baseado em testes para diferentes materiais de fio de arame. Para o material desse trabalho os dados podem ser aproximados na forma de uma função exponencial

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

Onde A e b são definidos pela Tabela 2 que lista esses parâmetros para diferentes tipos de material de arame. O valor de d é expresso em milímetros.

Tabela 2 - Coeficientes e expoentes para a equação (1).

Nº ASTM	Material	Intervalo		Expoente b	Coeficiente A	
		mm	in		MPa	psi
A227	Repuxado a frio	0,5-16	0,020-0,625	-0,182 2	1753,3	141040
A228	Fio musical	0,3-6	0,010-0,250	-0,162 5	2153,5	184649
A229	Revenido em óleo	0,5-16	0,020-0,625	-0,183 3	1831,2	146780
A232	Cromo-v	0,5-12	0,020-0,500	-0,145 3	1909,9	173128
A401	Cromo-s	0,8-11	0,031-0,437	-0,093 4	2059,2	220779

Fonte: Norton (2004)

2.2.2.2 Resistência ao Cisalhamento

Testes apontaram que a resistência ao cisalhamento em materiais comumente usados em molas é de aproximadamente 67% do limite de resistência do material, portanto

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

2.2.2.3 Tensões Residuais

Quando o fio é dobrado para deixar a mola em formato curvo tensões residuais se formam em sua superfície, de tração na interior e de compressão na exterior. E elas podem ser removidas por alguns tratamentos, dentre eles o Ajuste e o Jateamento por esferas.

O ajuste se trata de introduzir tensões residuais benéficas à mola para aumentar a capacidade de carga estática e de armazenamento de energia por peso do material. Por aumentar o custo do processo, nem todas as molas comercializadas são ajustadas. Neste trabalho o custo por enquanto não será prioridade e sim um projeto seguro, então será adotado o critério de molas ajustadas.

Outra forma de obter tensões benéficas nas molas é pelo Jateamento por Esferas, esse processo é recomendado para trabalhos sobre fadiga, sendo pouco efetivo para cargas estáticas, como este projeto trabalhará exatamente com cargas cíclicas então será adotado que a mola será jateada.

2.3 PRINCIPAIS PARÂMETROS DA MOLA HELICOIDAL DE COMPRESSÃO

Molas padronizadas como a estudada nesse trabalho apresentam alguns parâmetros importantes para projeto, como o já apresentado diâmetro de fio (d), o diâmetro médio de espira (D), comprimento livre (L_f) e número total de espiras (N_t). A partir desses parâmetros é possível definir a geometria geral da mola como comprimento fechado (L_s), diâmetro externo (D_o) e diâmetro interno (D_i), estes dois últimos são importantes para definir o furo mínimo ($furo_{min}$) em que a mola irá se alojar e o pino máximo ($pino_{max}$) na qual a mola será colocada, respectivamente.

2.3.1 Índice de mola e diâmetro médio

O ponto de partida de um projeto de mola é a definição do índice de mola c , que é a razão entre o diâmetro médio de espira D e o diâmetro de fio d .

$$c = \frac{D}{d} \quad (3)$$

Na sala de aula o aluno deve adotar um valor para C e ao decorrer do projeto verificar se ele adotou um valor apropriado, se seus cálculos não atenderem aos critérios estabelecidos o aluno deve mudar o valor do C e refazer todo o projeto até conseguir resultados minimamente satisfatórios, já que a partir desse ponto praticamente todos os cálculos dependerão direta ou indiretamente do valor de C.

No projeto desse trabalho serão realizados cálculos para todos os valores de C, então serão mostrados para o usuário os resultados correspondentes apenas das molas com valores de C que foram aprovados em todos os testes.

Depois de definidos os valores de d e C, com a equação (3) obtém-se o valor de D.

2.4 ANÁLISE DO CARREGAMENTO DA MOLA

Em uma mola existirão duas componentes de tensão na seção transversal da espira, uma tensão de cisalhamento por torção devido ao torque e uma tensão de cisalhamento devido à força cortante. Além do mais, devido ao formato curvado do fio haverá concentração de tensões na superfície interna da curvatura.

2.5 FATORES DE TENSÃO

Diretamente das equações da tensão para carregamento sobre compressão, com componentes de torção e cisalhamento, tiramos uma constante chamada *fator de cisalhamento direto* K_s .

$$\tau = \frac{Tr}{J} + \frac{F}{A} = \frac{F(D/2)(d/2)}{\pi d^4/32} + \frac{F}{\pi d^2/4} = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad (4)$$

Substituindo a equação (3) para D na equação (4).

$$\tau = \frac{8FC}{\pi d^2} + \frac{4F}{\pi d^2} = \frac{8FC + 4F}{\pi d^2} = \frac{8FC}{\pi d^2} \left(1 + \frac{1}{2C}\right) = \frac{8FD}{\pi d^3} \left(1 + \frac{0,5}{C}\right) \quad (5)$$

$$K_s = \left(1 + \frac{0,5}{C}\right) \quad (6)$$

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (7)$$

Wahl (1963) determinou o fator de concentração de tensões devido à curvatura da mola, nomeado de fator de Wahl (K_w).

$$K_w = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad (8)$$

2.6 TENSÕES ATUANTES

Em se tratando de um carregamento cíclico de fadiga haverá componentes da média e inicial também, essa última devida a pré-carga na mola. Haverá também uma tensão que inclui tanto o efeito das tensões de cisalhamento quanto a concentração de tensões devido à curvatura.

2.6.1 Análise do carregamento operacional

As forças que atuaram diretamente na mola serão dadas no enunciado do exercício para os alunos de graduação, nesse projeto funcionará da mesma forma onde os valores de força máxima (F_{max}) e força inicial ou mínima (F_{min}) será dados de entrada, fornecidos pelo próprio usuário. A partir dessas forças pode-se calcular as componentes de força alternada (F_{alt}) e força média (F_{med}). A literatura recomenda que a razão ($F_{min}/F_{max} < 0,8$), caso contrário um aviso será dado ao usuário.

$$F_{med} = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \quad (9)$$

$$F_{alt} = \frac{F_{max} - F_{min}}{2} \quad (10)$$

2.6.2 Tensões

Com o conhecimento de todas as forças e suas componentes as tensões podem ser calculadas, como a tensão inicial (τ_i), tensão média (τ_{med}) e tensão alternada (τ_a).

$$\tau_i = K_s \frac{8F_{min}D}{\pi d^3} \quad (11)$$

$$\tau_{med} = K_s \frac{8F_{med}D}{\pi d^3} \quad (12)$$

$$\tau_a = K_w \frac{8F_{alt}D}{\pi d^3} \quad (13)$$

2.7 RESISTÊNCIAS DE MOLAS DE COMPRESSÃO

Para o projeto de uma mola será necessário os dados relativos à resistência de escoamento e fadiga.

2.7.1 Resistência ao escoamento sob torção

A resistência ao escoamento sob torção S_{ys} de fios de molas varia com o tipo de material e depende do fato da mola ter sido calibrada ou não, como explicado anteriormente. A Tabela 3 mostra a porcentagem de resistência à tração do fio que será usado para cada caso.

Tabela 3 - Resistência de escoamento torcional máxima S_{ys}

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

Fonte: Norton (2004)

Como explicado anteriormente, será adotado molas ajustadas, então terá

$$S_{ys} = 0,65S_{ut} \quad (14)$$

2.7.2 Limite de resistência à fadiga torcional para carregamento repetido

Para esse projeto foi considerado vida infinita para fadiga torcional. Com o aumento da resistência à tração os materiais da mola tendem a mostrar um nivelamento de seus limites de resistência à fadiga. Pesquisas mostram que todos os fios de mola de menos de 10 mm de diâmetro (que é o caso desse trabalho, pois o limite máximo recomendado para esse material é de 6,5 mm) apresentam um limite de resistência à fadiga torcional S_{ew} para vida infinita definido como

$$S_{\text{ew}} \cong 45,0 \text{ kpsi (310 MPa)} \quad \text{para molas não-jateadas} \quad (15)$$

$$S_{\text{ew}} \cong 67,5 \text{ kpsi (465 MPa)} \quad \text{para molas jateadas} \quad (16)$$

Como já explicado, será adotado a condição de molas jateadas, então será usado o valor na SI de $S_{\text{ew}} = 465 \text{ MPa}$.

2.7.3 Limite de resistência à fadiga torcional para carregamento alternado

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

$$S_{\text{es}} = 0,5 \frac{S_{\text{ew}} S_{\text{us}}}{S_{\text{us}} - 0,5 S_{\text{ew}}} \quad (17)$$

2.8 COEFICIENTE DE SEGURANÇA PARA FALHA POR FADIGA TORCIONAL

Para determinar o coeficiente de segurança com relação à falha por fadiga torcional é necessário usar o critério de Goodman modificado, que é uma equação tirada do diagrama modificado de Goodman da figura 2 que mostra a linha de carga e dados necessários para o cálculo do coeficiente de segurança de uma mola de compressão carregada dinamicamente.

2.9.1 Detalhes de Extremidades

Primeiro fator importante a se conhecer é o detalhe das extremidades da mola, ou seja, os lugares da mola onde estarão em contato com o ponto de aplicação da carga. Há 4 tipos de extremidades para molas helicoidais de compressão e cada um com sua influência na geometria da mola.

2.9.1.1 Extremidades simples

A primeira extremidade é a simples, que resulta do corte simples das espiras deixando as extremidades com o mesmo passo que o resto da mola. Essa é a forma mais barata, porém fornece o alinhamento mais pobre com relação à superfície da carga aplicada.

Figura 3 - Extremidades simples



Fonte: Norton (2004)

2.9.1.2 Extremidades simples e esmerilhadas

O segundo caso é quando as extremidades são esmerilhadas para ficarem planas e perpendiculares ao eixo da mola e assim produzindo uma superfície normal em relação à superfície da carga aplicada.

Figura 4 - Extremidades simples e esmerilhadas

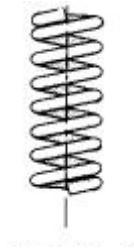


Fonte: Norton (2004)

2.9.1.3 Extremidades esquadrejadas

Neste caso as extremidades são levadas ao escoamento para torna-las planas e remover seu passo, isso melhora o alinhamento.

Figura 5 - Extremidades esquadrejadas

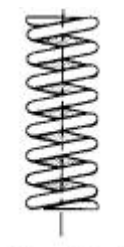


Fonte: Norton (2004)

2.9.1.4 Extremidades esquadrejadas e esmerilhadas

O último caso é quando se esquadreja e esmerilha as extremidades combinadamente. É o tratamento que proporciona o melhor alinhamento com a superfície da carga aplicada, porém também é o mais custoso. É recomendado para molas que serão usadas em máquinas, a menos que o diâmetro do fio seja muito pequeno (menor que 0,5 mm), caso em que elas devem apenas ser esquadrejadas, mas sem esmerilhamento.

Figura 6 - Extremidades esquadrejadas e esmerilhadas



Fonte: Norton(2004)

2.10 CONSTANTE DE MOLA E NÚMERO DE ESPIRAS

A constante inicial de mola pode ser calculada da seguinte forma

$$k = \frac{\Delta F}{y_{trab}} \quad (19)$$

Sendo que a diferença de força será um dado de entrada do programa, também conhecido do aluno, pois normalmente é dado pelo exercício, assim como y_{trab} . Depois de calculado a constante de mola resta calcular o número de espiras ativas.

O número total de espiras N_t pode ou não contribuir para a deflexão dependendo do tratamento da extremidade. O número de espiras ativas N_a contabiliza as espiras que efetivamente contribuem para a deflexão da mola e é calculada a partir da expansão da Equação (19)

$$k = \frac{\Delta F}{y} = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \quad (20)$$

Onde G é uma constante chamada de módulo de cisalhamento e que para o material A228 será de 80,8 GPa. Com o conhecimento do valor de k então se acha N_a . O valor encontrado deve ser arredondado para o valor do $\frac{1}{4}$ acima mais próximo. Com isso então se tem o valor ajustado do número de espiras ativas, N_a^* .

Com o valor de N_a^* volta na Equação (20) e recalcula a constante de mola, se tem então o valor ajustado da constante de mola, k^* , e é esse valor que será usado daqui em diante para calcular os parâmetros seguintes.

Com o valor N_a^* em mãos deve-se calcular o número de espiras totais N_t , e esse número vai depender do tipo de extremidade que foi usada.

Para extremidades simples, Figura (3), o número de espiras totais será o mesmo do número de espiras ativas, pois apenas foi cortado um pedaço de sua extremidade sem remover o passo

$$N_a = N_t \quad (21)$$

Para o caso da Figura (4) se perderá aproximadamente metade da primeira e última espira, logo o número de espira ativas será o total delas menos essa espira que se perdeu

$$N_a = N_t - 1 \quad (22)$$

Esquadrear um espira significa leva-la ao escoamento, então se “perderá” a primeira e última espira por completo, logo as espiras ativas será duas a menos que o total de espiras

$$N_a = N_t - 2 \quad (23)$$

Quando se esquadreja e esmerilha juntamente a lógica da Equação (23) é mantida, ou seja, duas espiras ativas são perdidas do total.

Sabendo então o número de espiras ativas é possível calcular o número total de espiras.

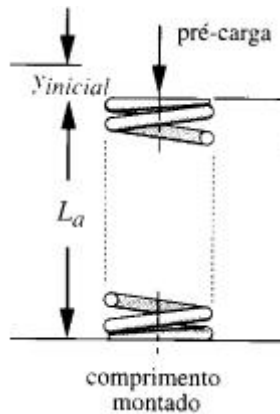
2.11 COMPRIMENTO DE MOLAS

A mola apresentará diferentes comprimentos e deflexões dependendo da situação da mesma.

2.11.1 Comprimento montado

Comprimento montado L_a é o comprimento da mola depois de instalada a deflexão inicial $y_{inicial}$ devido à carga mínima, normalmente exercida pela pré-carga. A deflexão inicial juntamente com a constante de mola determina o valor da pré-carga.

Figura 7 - Comprimento montado



Fonte: Norton (2004)

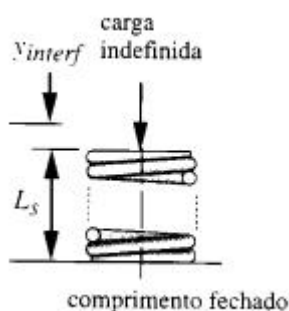
Onde a deflexão inicial pode ser calculada da seguinte forma

$$y_{inicial} = \frac{F_{inicial}}{k} \quad (24)$$

2.11.2 Comprimento fechado

Comprimento fechado L_s é o comprimento quando a mola é comprimida ao ponto de todas as espiras se tocarem.

Figura 8 - Comprimento fechado



Fonte: Norton (2004)

Um valor mínimo de interferência de 10-15% é recomendado para evitar que se atinja a altura de mola fechada enquanto em serviço. Esse percentual será inserido pelo usuário no programa, sendo que se ele inserir um valor fora desse limite um aviso será dado.

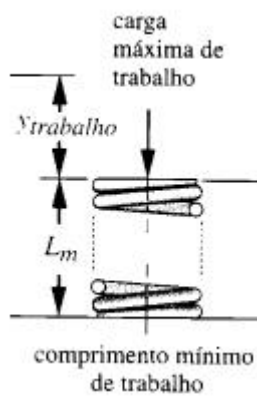
$$y_{interf} = 0,15y_{trab} \quad (25)$$

$$L_s = dN_t \quad (26)$$

2.11.3 Comprimento mínimo de trabalho

Quando em trabalho a mola receberá uma carga máxima de trabalho, que irá fazer uma deflexão de trabalho y_{trab} na mola, deixando a mola com um comprimento mínimo de trabalho L_m . Esse comprimento é a menor dimensão que a mola chegará em trabalho.

Figura 9 - Comprimento mínimo de trabalho

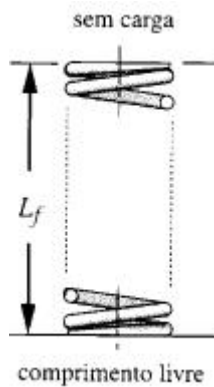


Fonte: Norton(2004)

2.11.4 Comprimento livre

O comprimento livre L_f é comprimento da mola quando livre de carga em suas extremidades.

Figura 10 - Comprimento livre



Fonte: Norton (2004)

$$L_f = L_s + y_{interf} + y_{trabalho} + y_{inicial} \quad (27)$$

2.12 ESTADO DE MOLA FECHADA

Em seguida serão analisados os parâmetros para a situação de mola fechada, onde ao final será calculado o coeficiente de segurança para este estado.

2.12.1 Força de mola fechada

A força de mola fechada é a força mínima necessária para deixar a mola com o comprimento de mola fechada. Esta força deverá ser maior que a força máxima aplicada na mola durante o serviço, para evitar que ela se feche. Primeiro é preciso calcular a deflexão da mola fechada $y_{fechada}$.

$$y_{fechada} = L_f - L_s \quad (28)$$

Então, a força para fechar a mola será

$$F_{fechada} = k y_{fechada} \quad (29)$$

Logo, essa força causará uma tensão, que pode ser calculada como

$$\tau_{fechada} = K_s \frac{8 F_{fechada} D}{\pi d^3} \quad (30)$$

Em seguida é preciso saber o coeficiente de segurança para a condição de mola fechada, como uma garantia de que a mola estará segura para essa configuração. E esse coeficiente é calculado da seguinte maneira

$$N_{sfechada} = \frac{S_{ys}}{\tau_{fechada}} \quad (31)$$

2.13 ANÁLISE DE FALHAS

2.13.1 Falha por flambagem

As molas helicoidais de compressão operam como se fossem colunas, logo, a possibilidade de falha por flambagem deve ser considerada. Para fazer essa análise é preciso calcular duas relações.

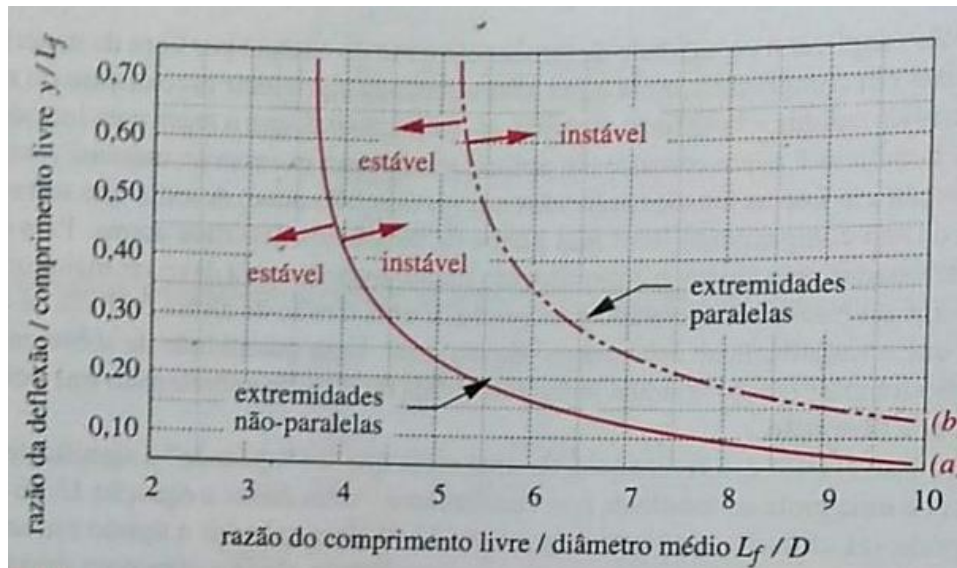
A primeira delas é a relação comprimento livre/diâmetro médio (Equação (32)) e a segunda é a relação deformação máxima/comprimento livre (Equação (33)).

$$L_f/D \quad (32)$$

$$\frac{y_{max}}{L_f} = \frac{y_{inicial} + y_{trab}}{L_f} \quad (33)$$

Em posse desses dois valores é possível verificar na Figura 11 se a mola irá flambar dependendo de cada caso de extremidade.

Figura 11 - Curvas de condições críticas de flambagem



Fonte: Norton(2004)

Para facilitar o projeto desse trabalho e por falta de conhecimento de antemão do tipo de extremidade que será usado pelo usuário será adotado que se a Equação (32) der um valor menor ou igual 4 então será considerado que o projeto é seguro para o critério de falha por flambagem. Percebe-se que se as extremidades forem paralelas essa consideração sempre estará correta, porém para extremidades não-paralelas haverá um pequeno pedaço em que a consideração não será válida. Por ser uma faixa pequena e por não ser o caso mais comum de extremidades então essa consideração será considerada válida. A falha por flambagem pode ser evitada caso a mola esteja dentro de um furo ou se pino estiver inserido na mola, outro motivo para considerar a aproximação descrita anteriormente como correta. Porém o atrito e desgaste da mola nos mesmos pode diminuir o tempo de vida e eficiência da mola, então considerações são exigidas.

2.13.2 Falha por ressonância

O último teste de falha pela qual a mola passa é o por falha por ressonância. Qualquer dispositivo com massa e elasticidade terá uma ou mais frequências naturais, e as molas não são exceção. Se elas entrarem em ressonância as espiras irão impactar uma na outra. A fim de evitar isso a mola não deve receber carga cíclica a uma frequência próxima à sua frequência natural. É recomendado que a frequência natural de vibração da mola seja maior que cerca de 13 vezes a frequência de qualquer esforço nela aplicado, ou seja

$$f_n/f > 13 \quad (34)$$

Sendo que a frequência de trabalho f em RPM é um dado de entrada do programa, então é preciso ser calculado a frequência natural f_n .

Primeiramente é preciso calcular a massa da mola, que além de ser um dado importante da mola, também será preciso para calcular a frequência natural. A massa W_a , em kg, é dado por

$$W_a = \frac{\pi^2 d^2 D N_a \gamma}{4} \quad (35)$$

Onde γ é a densidade em peso do material, para o aço A228 tem o valor de 7800 kg/m^3 . Com isso é calculado então a frequência natural da mola, em Hz.

$$f_n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{kg}{W_a}} = \frac{2}{\pi N_a} \frac{d}{D^2} \sqrt{\frac{Gg}{32\gamma}} \quad (36)$$

Onde g é valor da aceleração gravitacional, e vale $9,81 \text{ m/s}^2$.

A relação da Equação (34) sendo respeitada então a mola estará aprovada no teste por ressonância.

A mola respeitando todos os critérios por falha ela estará aprovada e será mostrada para o usuário, se falhar em apenas um teste será reprovada e será omitida.

2.14 FOLGAS DIAMETRAIS

Normalmente uma mola é usada com um pino em seu interior ou inserida em um furo, ou até mesmo usada para ambos os casos. Para saber quais os valores de diâmetros mínimo do furo e máximo do pino é preciso antes saber os valores de diâmetro interno D_i e diâmetro externo D_o .

$$D_o = D + d \quad (37)$$

$$D_i = D - d \quad (38)$$

O menor valor de diâmetro de furo para a mola ser inserida deve ser no mínimo ligeiramente maior que o diâmetro externo da mola. Analogamente, o maior valor de diâmetro de pino para ser inserido na mola deve ser no máximo ligeiramente menor que o diâmetro interno da mola. Deve haver folgas diametrais mínimas que possibilite que tanto a mola entre com folga em um furo como para um pino ser inserido na mesma, porém não devem ser grandes o suficiente para causar um balanço adicional na mola. Então é adotada folga no valor de 5% do valor de diâmetro médio, como mostram as equações a seguir

$$furo_{min} = D_o + 0,05D \quad (39)$$

$$pino_{max} = D_i - 0,05D \quad (40)$$

Com isso a mola está toda projetada e os principais dados das aprovadas serão mostrados ao usuário.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa para o projeto da mola especificada anteriormente será feito em Excel e em VBA, para tornar o programa mais interativo, prático e rápido. Deste ponto em diante todas as fórmulas, tabelas e gráficos foram criadas pelo próprio autor deste trabalho.

3.1 TABELAS DE CÁLCULOS

Primeiramente em uma planilha a parte serão feitas tabelas onde serão calculados todos os parâmetros da mola, bem como destacar as molas aprovadas.

Primeiro passo é montar a tabela que receberá os dados fornecidos pelo usuário, que calculará os primeiros parâmetros e especificará algumas constantes.

Tabela 4 - Tabela com dados fornecidos pelo usuário

	A	B	C	D	E	F
13		yt(m)			Extrem	
14		df(m)			%int	
15		Fmax(N)				
16		Fmin(N)			Yint	
17		Fm(N)				
18		Fa(N)				
19		Sut(Pa)				
20		Sus(Pa)				
21		Sys(pa)				
22		Sew(pa)	4,65E+08			
23		Ses(pa)				
24		k(N/m)				
25		G(Pa)	8,08E+10			
26		Peso(kg/n	7800			
27		g(m/s ²)	9,81			
28		Freq(RPM)				

Fonte: Autoria própria

As células destacadas em amarelo são onde estarão os dados fornecidos pelo usuário. Os dados recebidos e calculados por essas tabelas já foram apresentados anteriormente, são eles:

y_{trab} , d , F_{max} , F_{min} , F_{med} , F_{alt} , S_{ut} , S_{us} , S_{ys} , S_{ew} , S_{es} , k , G , γ , g , f .

A partir da célula C17 serão calculados os parâmetros dependentes apenas dos dados inseridos pelo usuário e nela terá a força média F_{med} que terá a seguinte forma no Excel

$$=MÉDIA(C15:C16) \quad (41)$$

Em C18 será calculada a força alternada F_{alt}

$$=(C15-C16)/2 \quad (42)$$

Em C19 será calculado o limite de resistência a tração S_{ut}

$$=(2153,5*((\$C\$14*1000)^{-0,1625}))*10^6 \quad (43)$$

Como na Equação (1) o valor de d é dado em milímetros e ele é inserido pelo usuário em metros é então preciso multiplicar esse valor por mil. Essa equação é originalmente dada em Mpa e como em todos cálculos de tensão usados nesse trabalho serão dados em Pa, então por isso ao final foi multiplicado por 10^6 .

Em C20 será calculado o limite de resistência ao cisalhamento S_{us}

$$=0,67*\$C\$19 \quad (44)$$

Em C21 será calculado a resistência de escoamento por torção S_{ys}

$$=0,65*\$C\$19 \quad (45)$$

Em C22 terá o valor do limite de fadiga torcional para carregamento repetido S_{sw} que é constante como discutido na Seção 2.7.2 e mostrado na Equação (15)

Em C23 será calculado o valor do limite de resistência à fadiga torcional sob carregamento alternado S_{ss}

$$=(0,5*\$C\$22*\$C\$20)/(\$C\$20-0,5*\$C\$22) \quad (46)$$

Em C24 será calculada a constante de mola k

$$=(\$C\$15-\$C\$16)/C13 \quad (47)$$

Em C25, C26 e C27 serão mostrados alguns valores constantes como o módulo de cisalhamento do material A228, sua densidade em peso e o valor da aceleração gravitacional, respectivamente.

Na célula E13, *Extrem*, terá um valor de 0 a 2, dependendo do tipo de extremidade escolhida, que será subtraído do número total de espiras para determinar o número de espiras ativas. Na mesma tabela terá: *%int* será um valor entre 0,1 e 0,15 que será a porcentagem de deflexão de trabalho.

Por final será calculado o índice de interferência *y_{interf}*

$$=F\$14* \$C\$13 \quad (48)$$

Ainda na mesma planilha terá outra tabela que fará todos os cálculos pertinentes a mola.

Tabela 5 - Tabela de cálculo geral da mola

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Estado	C	D(m)	Ks	Ti(Pa)	Tm(Pa)	Kw	Ta(Pa)	Nfs	Na	Na*	k*	Nt
2		4											
3		5											
4		6											
5		7											
6		8											
7		9											
8		10											
9		11											
10		12											

Fonte: Autoria própria

A primeira coluna, A, estará destinada a dizer se a mola foi ou não aprovada. Nela estará escrito APROVADO para as molas que forem aprovadas em todos os testes ou REPROVADO para a mola que reprovar em um ou mais testes.

A coluna B estará com os valores dos índices de mola recomendados, essa além de ser a coluna base para todos os demais cálculos será também a partir dela que serão destacadas as molas aprovadas.

Na coluna C será calculado o valor do diâmetro médio *D*.

$$=B2* \$C\$14 \quad (49)$$

Tanto para essa como para as demais demonstrações das fórmulas no Excel será usado a primeira linha de cálculo como exemplo.

Coluna D, fator de cisalhamento direto K_s

$$=1+(0,5/B2) \quad (50)$$

Coluna E, tensão inicial τ_i

$$=(D2*8*SC\$16*C2)/(PI()*(\$C\$14)^3) \quad (51)$$

Coluna F, tensão media τ_{med}

$$=(D2*8*SC\$17*C2)/(PI()*(\$C\$14)^3) \quad (52)$$

Coluna G, fator de Wahl K_w

$$=((4*B2-1)/(4*B2-4))+(0,615/B2) \quad (53)$$

Coluna H, tensão alternada τ_a

$$=(G2*8*SC\$18*C2)/(PI()*(\$C\$14)^3) \quad (54)$$

Coluna I, coeficiente de segurança para fadiga N_{fs}

$$=(\$C\$23*(\$C\$20-E2))/((\$C\$23*(F2-E2))+(\$C\$20*H2)) \quad (55)$$

Coluna J, número de espiras ativas N_a

$$=((\$C\$14^4)*\$C\$25)/(8*(C2^3)*\$C\$24) \quad (56)$$

Coluna K, o número corrigido das espiras N_a^*

$$=SE(J2>(MARRED(J2;0,25));(MARRED(J2;0,5));(MARRED(J2;0,25))) \quad (57)$$

Essa função SE diz que se o valor da Equação (56) for maior que o próximo múltiplo de 0,25 o número será arredondado para o múltiplo de 0,5, caso contrário será arredondado para o próximo múltiplo de 0,25, por exemplo, se der 11,31 o número será arredondado para 11,50

ou se der 27,59 será arredondado para 27,75 e assim por diante. Para garantir que o número de espiras ativas corrigido dê o próximo múltiplo de 0,25 do valor encontrado do número de espiras ativas.

Coluna L, constante de mola real k^* . Recalculo da Equação (47) com o novo valor de espiras ativas

$$=((\$C\$14^4)*\$C\$25)/(8*(C2^3)*K2) \quad (58)$$

Coluna M, número total de espiras N_t . Vai somar os valores achados na equação anterior com o número da célula F13, que dirá respeito ao tipo de extremidade escolhida pelo usuário

$$=K2+\$F\$13 \quad (59)$$

A seguir tem a continuação da Tabela 5.

Tabela 6 - Continuação da tabela de cálculo geral da mola

N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
Ls(m)	Yi(m)	Lf(m)	Ff(N)	Tf(Pa)	Nsf	Lf/D	Ymax/Lf	Wa(kg)	Fn(rpm)	Fn/F	Dex(mm)	Din(mm)	FUOmin	PINOmax

Fonte: Autoria própria

Coluna N, altura fechada L_s

$$=\$C\$14*M2 \quad (60)$$

Coluna O, deflexão inicial $y_{inicial}$

$$=\$C\$16/L2 \quad (61)$$

Coluna P, comprimento livre L_f

$$=N2+\$F\$16+\$C\$13+O2 \quad (62)$$

Coluna Q, força à altura de mola fechada $F_{fechada}$

$$=L2*(P2-N2) \quad (63)$$

Coluna R, tensão na altura fechada $\tau_{fechada}$

$$=(D2*8*Q2*C2)/(PI()*\$C\$14^3) \quad (64)$$

Coluna S, coeficiente de segurança para altura de mola fechada $N_{s_{fechada}}$

$$=\$C\$21/R2 \quad (65)$$

Coluna T, índice de esbeltez L_f/D

$$=P2/C2 \quad (66)$$

Coluna U, índice de esbeltez y_{max}/L_f

$$=(O2+\$C\$13)/P2 \quad (67)$$

Coluna V, peso da mola W_a

$$=((PI())^2)*(\$C\$14^2)*C2*K2*\$C\$26)/4 \quad (68)$$

Coluna W, frequência natural f_n

$$=(120*\$C\$14*RAIZ((\$C\$25*\$C\$27)/(32*\$C\$26)))/(PI()*K2*(C2^2)) \quad (69)$$

Coluna X, razão f_n/f

$$=W2/\$C\$28 \quad (70)$$

Coluna Y, diâmetro externo D_o

$$=(C2+\$C\$14)*1000 \quad (71)$$

Coluna Z, diâmetro interno D_i

$$=(C2-\$C\$14)*1000 \quad (72)$$

Para os valores dos diâmetros externo e interno o valor será apresentado em milímetros, por isso a multiplicação por mil no final das fórmulas.

Coluna AA, diâmetro mínimo de furo $furo_{min}$

$$=N15+(50*C2) \quad (73)$$

Coluna AB, diâmetro máximo de pino $pino_{max}$

$$=O15-(50*C2) \quad (73)$$

3.2 GRÁFICOS

Uma das propostas do trabalho, além de mostrar os resultados numéricos, é dar aos usuários gráficos que possibilitem uma melhor interpretação e visualização dos resultados encontrados. Esses gráficos também servirão como auxílio caso o usuário queira escolher apenas uma mola dentre todas que foram aprovadas. Com eles o usuário poderá ver exatamente onde e porque as molas foram aprovadas ou reprovadas, pois eles fornecem dados não apenas das molas aprovadas como também das reprovadas.

Primeiramente foi criada outra tabela com o resumo de alguns resultados das Tabelas 5 e 6, que tem por objetivo mudar algumas unidades para melhor elaboração dos gráficos. Tudo que estava em metros e quilogramas nessa nova tabela foi passado para milímetros e gramas, respectivamente.

Tabela 7 - Resumo dos resultados

	J	K	L	M	N	O	P	Q
14	C	Nt	Lf(mm)	Wa(g)	Dex(mm)	Din(mm)	FUOmin	PINOmax
15	4							
16	5							
17	6							
18	7							
19	8							
20	9							
21	10							
22	11							
23	12							

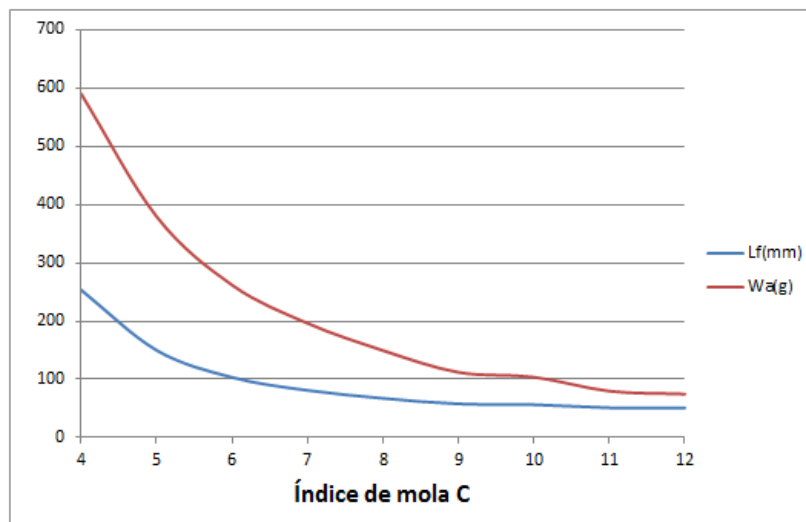
Fonte: Autoria própria

Foram elaborados então três gráficos relacionando o índice de mola com os principais parâmetros. Foi usado o índice de mola como comparador padrão nos gráficos, pois é sobre esse parâmetro que o programa irá testar todas as possibilidades.

O primeiro gráfico relaciona o índice de mola com outros dois parâmetros distintos, comprimento livre e peso total da mola. Apesar de serem parâmetros que não tem a mesma unidade, comprimento em milímetros e peso em gramas, eles tem a mesma ordem de grandeza.

Esse gráfico é construído selecionando na Tabela 7 a coluna J como eixo das abcissas e as colunas L e M como eixo das ordenadas, depois escolhendo o gráfico Dispersão do Excel, com Linhas Suaves, que será o mesmo tipo de gráfico para todos. Um modelo exemplo desse gráfico pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Gráfico de comportamento do peso e comprimento livre

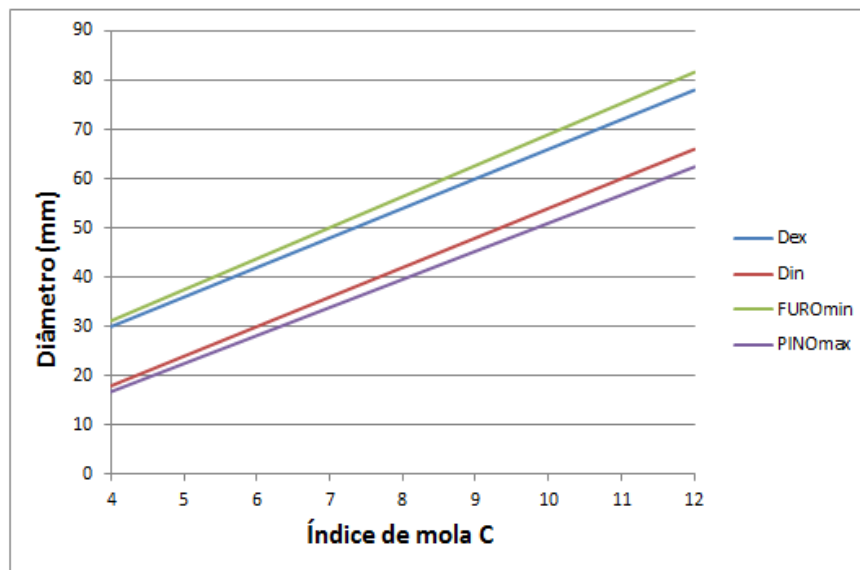


Fonte: Autoria própria

O próximo gráfico irá mostrar o comportamento dos diâmetros da mola e as folgas diametrais mínimas para o seu ajuste seguro.

Esse gráfico será construído selecionando além da coluna J como eixo das abcissas novamente também as colunas N, O, P e Q como eixo das ordenadas. Um exemplo é mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Gráfico de comportamento dos diâmetros e folgas



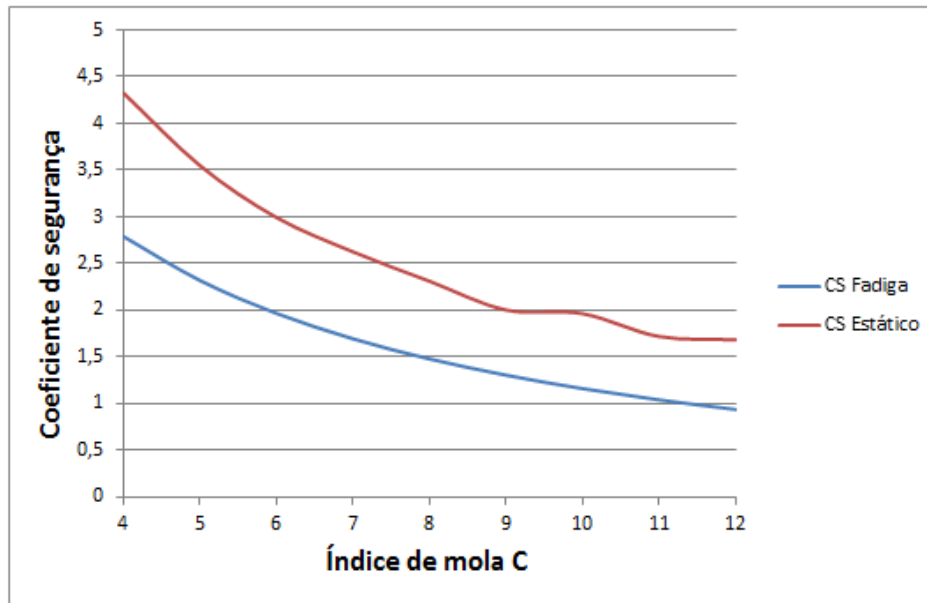
Fonte: Autoria própria

Este gráfico é especialmente interessante, pois o usuário pode ver de maneira bem clara o significado do furo mínimo e do pino máximo. A reta verde que representa o furo mínimo está ligeiramente acima da reta azul, que representa o diâmetro externo, observação essa compatível com a teoria que diz que o menor furo deve ser no mínimo ligeiramente maior, e nunca igual ou menor, que o diâmetro externo da mola, e como se pode ver existe uma “folga” entre essas duas retas que é exatamente a folga que existirá entre a espira da mola e a parede do furo.

O terceiro e último gráfico mostrará o comportamento dos coeficientes de segurança para fadiga e para mola fechada.

Diferentemente dos anteriores ele não será construído a partir da Tabela 7 pois todos parâmetros são adimensionais, não precisaram modificar suas unidades, então foi usado as próprias Tabelas 5 e 6. Foram usadas as colunas I e S como eixo de ordenada. O comportamento de gráfico é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Gráfico de comportamento dos coeficientes de segurança



Fonte: Autoria própria

3.3 FORMATAÇÃO CONDICIONAL

Para melhor visualização dos resultados que foram aprovados e reprovados foi criado uma formatação nas Tabelas 5 e 6, nas colunas I, Q, S, T e X, onde se fazem testes para verificar a segurança da mola. Nessas colunas os números que obedecerem aos critérios apropriados ficarão em azul, ou seja, para aquele critério estará aprovado, caso contrário o número ficará em vermelho.

Na coluna I, coeficiente de segurança para fadiga, o critério é $N_{fs} > 1$, para a coluna Q, força à altura de mola fechada, é $F_f > F_{max}$, para a coluna S, coeficiente de segurança para altura de mola fechada, é $N_{sf} \geq 2$, para coluna T, índice de esbeltez para falha por flambagem L_f/D , é $L_f/D \leq 4$ e, finalmente, para a coluna X, razão f_n/f , é $f_n/f > 13$.

Essa formatação é feita selecionando toda coluna em que você quer formatar e indo a Formatação Condicional e depois Nova Regra. Na janela que abrir selecionar Formatar Apenas Células que Conttenham, depois nas caixas de seleção em que aparecem selecionar Valor da Célula → É Maior do Que (ou É Menor do Que) → e na última caixa colocar o valor ao qual o valor da célula ficará azul, ou seja, aprovado. Depois ir à mesma caixa de diálogo ir a Formatar → Fonte → Cor na caixa de seleção de cor selecionar a cor azul, então OK → OK.

Depois disso só fazer o mesmo processo, mas para a situação em que o valor ficará vermelho, ou seja, reprovado.

Na coluna A, Estado, foi criado um condicional para mostrar quais as molas foram aprovadas ou reprovadas. Esse condicional será

$$=SE(E(I2 \geq 1; Q2 \geq \$C\$15; S2 \geq 2; T2 \leq 4; X2 \geq 13);$$

$$"APROVADO"; "REPROVADO") \quad (74)$$

Ou seja, se os critérios acima forem todos obedecidos então aparecerá a mensagem APROVADO, se reprovar apenas em um critério aparecerá a mensagem REPROVADO.

3.4 INTERFACE COM O USUÁRIO

Em uma planilha diferente da usada anteriormente para os cálculos será feita uma outra tabela onde o usuário poderá inserir os dados, dar os comandos para iniciar os cálculos e limpar os dados para realizar nova pesquisa, como mostra a figura abaixo.

Figura 15 - Interface com o usuário

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	A228 (fio musical)											
2												
3	Deflexão de trabalho (m)											
4												
5	Diâmetro do fio (m)											
6												
7	Força máxima (N)											
8												
9	Força mínima (N)											
10												
11	Frequência de excitação (RPM)											
12												
13	Tolerância de contato (0,1 - 0,15)											
14												
15	Tipo de extremidade de contato											
16												
17												
18												

Fonte: Autoria própria

Onde os dados inseridos são respectivamente y_{trab} , d , F_{max} , F_{min} , f , a porcentagem da tolerância de contato e tipo de extremidade.

Algumas precauções foram tomadas para que o usuário não se confunda ou coloque dados errados, como: identificar qual o material da mola usado, quais os parâmetros requeridos e as unidades dos mesmos.

O trabalho foi todo feito nas unidades SI, assim como os resultados retornados respeitarão esse critério.

Para a inserção dos dados foram criados caixas de texto (TextBox) e botões de opção (OptionButton) para determinar qual o tipo de extremidade que será usada. Para esse último é importante ressaltar que não tem a opção “Esquadrejada e esmerilhada”, pois para fins matemáticos ela terá o mesmo impacto que a opção “Esquadrejada”, ou seja, somará em duas unidades o número de espiras ativas para se obter o número de espiras totais, por isso ela foi omitida, pois ela apenas fará diferença na fabricação e obtenção da mola, porém o programa apenas projetará a mola. Em seguida foi criada a tabela que irá retornar os valores para o usuário.

Tabela 8 - Tabelas das molas aprovadas

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
20	APROVADO								
21	Molas selecionadas								
22	C	Wa(g)	Nt	CS	Lf(mm)	Dex(mm)	Din(mm)	FUOmir	PINOmax(mm)
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									

Fonte: Autoria própria

Foi construída também uma pequena tabela com os valores das constantes usadas no trabalho.

Tabela 9 - Constantes utilizadas

Constantes usadas
$S_{ys} = 0,65 S_{ut}$
$S_{ew} \cong 465 \text{ MPa}$
$G = 80,8 \text{ GPa}$
$\gamma = 7800 \text{ kg/m}^3$
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Fonte: Autoria própria

Os gráficos que serão mostrados para o usuário precisam ser movidos da planilha de cálculos para essa interface, afinal será usado também como dado de saída. Para isso o procedimento a ser seguido é: clicar com o botão direito do mouse em cima do gráfico → Mover Gráfico → Objeto em → Selecionar a planilha onde estão os dados de entrada e saída → OK. Repetir o processo para os demais gráficos.

3.4.1 Programação

Foi desenvolvida uma programação tanto com fórmulas do Excel como em VBA para tornar possíveis os dados de entrada ir da planilha de interface com o usuário para a planilha de cálculos e depois para fazer com que os resultados retornem.

Na tabela onde o usuário irá inserir os dados, Figura 15, foi feita uma programação em VBA para poder usar as caixas de texto, botões e caixas de seleção e também para poder passar os dados ali inseridos para a planilha de cálculos.

Para acessar o VBA basta apertar Alt+F11, na janela que abrir dar dois cliques na planilha de interface e digitar o código. A seguir será mostrado o código e suas funções.

```
Private Sub CommandButton1_Click()
Dim yt, df, fmax, fmin, freq, tc As Double
Dim s As Integer
Dim W As Worksheet
Dim W2 As Worksheet
```

Ao apertar o botão “Executar” o programa irá fazer tudo que se seguir nas linhas a baixo do código. A segunda e terceira linha do código acima são as atribuições de nomes aos parâmetros. Quarta e quinta linha está atribuindo nome as planilhas usadas nesse trabalho, “W” para a planilha de interface com o usuário e “W2” para a planilha de cálculos.

```
Set W = Sheets("Plan4")
Set W2 = Sheets("Plan3")
Application.ScreenUpdating = False
W.Select
yt = TextBox1.Value
df = TextBox2.Value
```

```
fmax = TextBox3.Value
fmin = TextBox4.Value
freq = TextBox5.Value
tc = TextBox6.Value
```

As duas primeiras linhas do código acima estarão atribuindo qual parâmetro irá pra qual planilha. Terceira linha fará com que após apertar “Executar” não mude para a planilha de cálculos automaticamente. Quarta linha vai selecionar a planilha de interface com o usuário. Da quinta à décima linha o programa irá ler os dados que estarão nas caixas de texto.

```
If OptionButton1.Value = True Then
s = 0
ElseIf OptionButton2.Value = True Then
s = 1
ElseIf OptionButton3.Value = True Then
s = 2
End If
```

O código acima diz respeito ao botão de opção para escolher a extremidade de contato. Se o usuário selecionar a primeira opção, Simples, o programa atribuirá o valor zero a variável “s”, pois como explicado na Seção 2.10 para extremidade simples o número de espiras ativas será igual ao número de espiras totais, ou seja, não somará valor nenhum no número de espiras ativas para computar o número de espiras totais. Caso o usuário selecione a segunda opção, Simples e esmerilhada, será atribuído o valor 1 a variável “s”, pois o número de espiras totais para esse tipo de extremidade é uma unidade maior que o número de espiras ativas. E se ele selecionar a última opção, Esquadrejada, será atribuído o valor 2 a variável “s”, seguindo o mesmo raciocínio dos itens anteriores.

```
W2.Select
W2.Range("C13").Value = yt
W2.Range("C14").Value = df
W2.Range("C15").Value = fmax
W2.Range("C16").Value = fmin
W2.Range("C28").Value = freq
```

```
W2.Range("F14").Value = tc
W2.Range("F13").Value = s
```

Aqui a primeira linha estará selecionando a planilha de cálculos. As linhas seguintes estão levando os valores lidos para a planilha de cálculo, exatamente para as células especificadas, que será a Tabela 4. De lá, como já foi mostrado, os cálculos todos serão feitos nas Tabelas 4, 5 e 6.

```
If TextBox2.Value < 0.0001 Or TextBox2.Value > 0.0065 Then
MsgBox "Diâmetro de fio deve estar entre 0,1 e 6,5 mm"
End If
```

```
If (TextBox4.Value / TextBox3.Value) > 0.8 Then
MsgBox "Razão Fmin/Fmax deve ser menor que 0,8"
End If
```

```
If TextBox6.Value < 0.1 Or TextBox6.Value > 0.15 Then
MsgBox "Valor de Tolerância deve estar entre 0,1 e 0,15"
End If
```

Acima estão avisos que serão dados caso o usuário não respeite alguns critérios já discutidos anteriormente. As três primeiras linhas dizem que se o usuário colocar um valor de diâmetro de fio fora do intervalo entre 0,1 e 6,5 milímetros o aviso dado será “Diâmetro de fio deve estar entre 0,1 e 6,5 mm”. As três linhas seguintes dizem que se a razão entre a força mínima e máxima for maior ou igual a 0,8 o aviso “Razão Fmin/Fmax deve ser menor que 0,8” será dado. E finalmente, as três últimas linhas dizem que se o valor da tolerância de contato estiver fora do intervalo 0,1 a 0,15 aparecerá o aviso “Valor de Tolerância deve estar entre 0,1 e 0,15”.

```
W.Select
Application.ScreenUpdating = True
End Sub
```

E aqui termina a função do botão “Executar”.

```

Private Sub CommandButton2_Click()
    TextBox1.Value = Empty
    TextBox2.Value = Empty
    TextBox3.Value = Empty
    TextBox4.Value = Empty
    TextBox5.Value = Empty
    TextBox6.Value = Empty
End Sub

```

Acima o código do botão “Limpar” que vai limpar os dados das caixas de texto para poder realizar uma nova pesquisa.

Para finalizar é preciso trazer os resultados da planilha de cálculo para a planilha de interface do usuário, então na tabela de molas aprovadas, Tabela 8, na célula A23 coloca-se o seguinte código:

```

={SEERRO(ÍNDICE(Tabela1[[Estado]:[C]];MENOR(SE(Tabela1[Estado]=$A$20;LIN
(Tabela1[Estado])-1);LIN(A1));2);""))}

```

Depois de inserido só arrastar esse código até o fim da coluna. Esse código irá à Tabela 5 e na coluna A, Estado, irá comparar o que está escrito ali com o que está escrito na célula A20 da Tabela 8, APROVADO. E ele guardará essa informação.

Ainda na Tabela 8, na célula B23 estará o código para inserir o valor do peso da mola para o primeiro C escrito APROVADO que foi armazenado do código anterior.

```

=SEERRO((PROCV(A23;Tabela1[[C]:[PINOmax]];21;FALSO))*1000;""))

```

Esse código vai selecionar da coluna B até a coluna AB da tabela de cálculos e vai colocar na célula selecionada, A23, o que está guardado na 21ª coluna, coluna V, o peso. Em seguida só puxar esse código pra baixo para fazer o mesmo para os demais valores de C. Para as outras colunas da Tabela 8 vai mudar apenas o numero da coluna que será selecionada na planilha de cálculos, por exemplo, para a próxima coluna, N_t , ao invés de estar 21 como no caso anterior, estará 12, que é coluna correspondente da Tabela 5, e assim por diante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como forma de ilustrar melhor o funcionamento do programa, foi desenvolvido o estudo de caso abaixo

Figura 16 - Estudo de caso (I)

The screenshot shows the 'A228 (fio musical)' software interface. It features a grid of input fields and buttons. The inputs are: Deflexão de trabalho (m) = 0,015; Diâmetro do fio (m) = Q007; Força máxima (N) = 700; Força mínima (N) = 600; Frequência de excitação (RPM) = 1200; Tolerância de contato (0,1-0,15) = 15; and Tipo de extremidade de contato with radio buttons for 'Simples', 'Simples e esmerilhada', and 'Esquadrejada'. There are 'Executar' and 'Limpar' buttons.

Fonte: Autoria própria

Logo após o usuário apertar o botão “Executar” aparecerão as seguintes mensagens

Figura 17 - Mensagens de erros

The screenshot shows the same software interface as Figure 16, but with three error messages from Microsoft Excel overlaid. The first message, labeled '1', states 'Diâmetro de fio deve estar entre 0,1 e 6,5 mm'. The second message, labeled '2', states 'Razão Fmin/Fmax deve ser menor que 0,8'. The third message, labeled '3', states 'Valor de Tolerância deve estar entre 0,1 e 0,15'. The interface also shows a table of 'Molas selecionadas' with columns for various parameters.

Fonte: Autoria própria

A caixa de mensagem 1 diz para o usuário que ele inseriu um valor de diâmetro de fio fora do intervalo permitido e mostra pra ele qual é este intervalo. A caixa de mensagem 2 diz que o usuário está trabalhando com um projeto quase estático, e que ele deve diminuir a razão entre a força mínima e força máxima. Finalmente, a caixa de mensagem 3 diz que ele inseriu um valor de tolerância de contato errado e que este número deve estar entre 0,1 e 0,15, este erro provavelmente ocorreu porque o usuário ao invés de digitar 0,15, no intuito de usar o valor de 15% para a tolerância de contato, colocou 15.

Abaixo um exemplo de um programa sem erros com os respectivos resultados.

Figura 18 - Estudo de caso (II)

A228 (fio musical)

Deflexão de trabalho (m)	0,015	Executar
Diâmetro do fio (m)	0,006	
Força máxima (N)	700	
Força mínima (N)	300	
Frequência de excitação (RPM)	1200	Limpar
Tolerância de contato (0,1 - 0,15)	0,15	
Tipo de extremidade de contato	☐ Simples ☐ Simples e esmerilhada ☒ Esquadrejada	

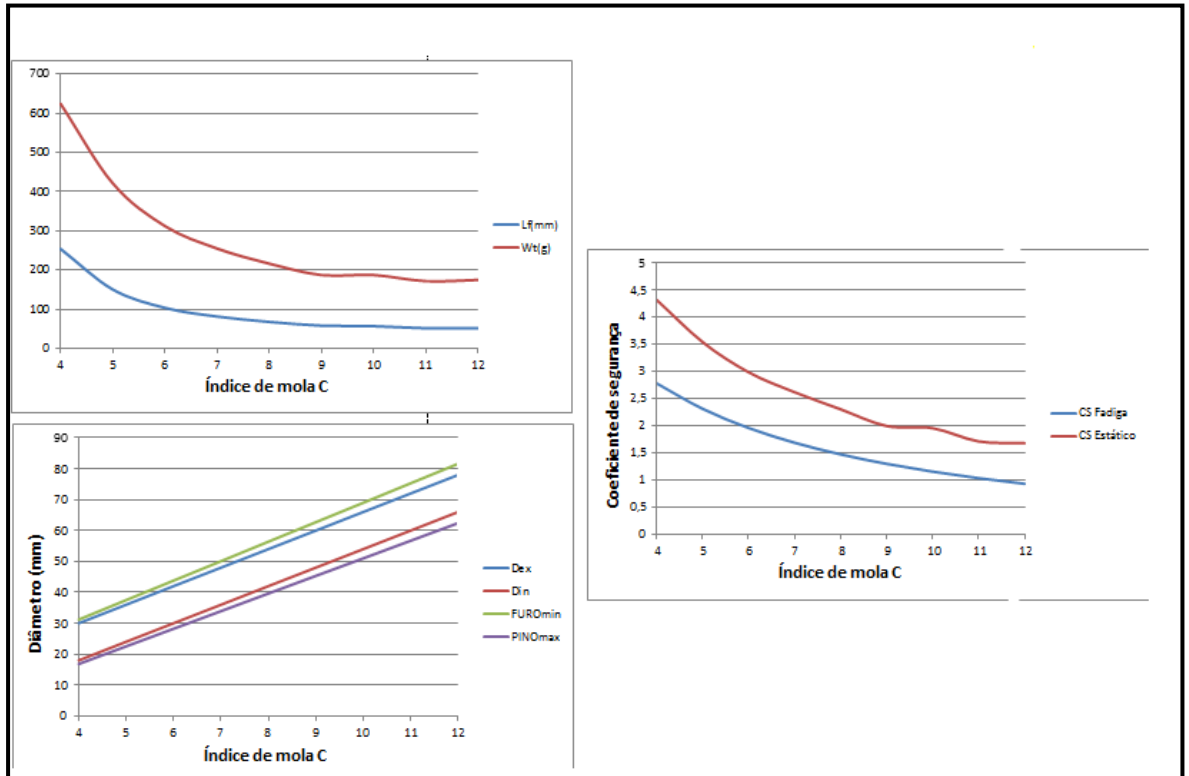
APROVADO

Molas seleccionadas									
C	Wt(g)	Nt	CS	Lf(mm)	Dex(mm)	Din(mm)	FUOmin(mm)	PINOmax(mm)	
6	311,781	12,5	2,99036	103,478	42	30	43,8	28,2	
7	254,621	8,75	2,62408	81,2116	48	36	50,1	33,9	
8	216,168	6,5	2,30859	67,6559	54	42	56,4	39,6	
9	187,068	5	2,00114	58,0767	60	48	62,7	45,3	

Fonte: Autoria própria

Além dos resultados numéricos também terão os gráficos para este estudo de caso.

Figura 19 - Gráficos do estudo de caso



Fonte: Autoria própria

Como visto geralmente o programa retornará para o usuário mais de um valor de mola aprovada, para seu público alvo esse resultado é o suficiente uma vez que o aluno irá verificar se o resultado que ele achou no papel condiz com o que foi dado pelo programa ou se pelo menos se aproxima, porém o intuito do programa é também dar a melhor experiência de projeto de mola para o aluno, fazendo com que ele possa ao final saber identificar a mola ideal para seu projeto, melhorando seu entendimento no assunto.

Para chegar à mola ideal o aluno encontrará algumas barreiras, como limitações do próprio projeto. Em primeiro lugar o usuário deverá encontrar uma ou mais molas seguras de acordo com os dados que tem em mão, ao final ele deve respeitar quaisquer limitações que o projeto imponha como limite de peso, tamanho ou diâmetro. A intenção é que ele se aproxime ao máximo dos limites requeridos pelo seu projeto.

Porém, o que é visto em salas de aula é que além dos dados iniciais o projeto não informa mais limitações, fazendo com que o aluno encontre a mola ideal diante daqueles dados apenas, assim ele terá mais de uma resposta certa para os exercícios, e em apenas

alguns casos o aluno se preocupará em saber se ele encontrou a melhor mola possível para aquele caso.

Para chegar à mola ideal o aluno terá dois caminhos: alterar alguns dados de entrada para que diminua o número de dados de saída ou usar o auxílio dos gráficos.

Percebe-se que muitas das fórmulas apresentadas, principalmente as de cálculo de tensão, o diâmetro de fio d é elevado à terceira ou quarta potência, então alterando levemente esse parâmetro ele terá um filtro melhor de resultados. É fácil de perceber que diminuindo o d o número de molas aprovadas cairá, e já que esse parâmetro na maioria das vezes o próprio aluno que arbitra usando as tabelas ele poderá usar isso ao seu favor para conseguir um único valor de mola aprovada.

Para exemplificar o que foi dito será pego o estudo de caso (II), mostrado anteriormente na Figura 18, e o valor de d será diminuído em apenas 1 mm.

Figura 20 - Estudo de caso (III)

A228 (fio musical)

Deflexão de trabalho (m)	0,015	Executar
Diâmetro do fio (m)	0,005	
Força máxima (N)	700	
Força mínima (N)	300	
Frequência de excitação (RPM)	1200	Limpar
Tolerância de contato (0,1 - 0,15)	0,15	
Tipo de extremidade de contato	☐ Simples ☐ Simples e esmerilhada ☒ Esquadrejada	

APROVADO

Molas selecionadas								
C	Wt(g)	Nt	CS	Lf(mm)	Dex(mm)	Din(mm)	FUOmin(mm)	PINOmax(mm)
6	158,777	11	2,17569	83,7985	35	25	36,5	23,5

Fonte: Autoria própria

Como pode ser visto na figura acima com uma simples mudança no d o resultado final se restringiu a apenas uma mola.

Porém, se o d for fixado pelo projeto então o usuário deverá, dentre os valores encontrados, escolher a mola ideal e para isso ele tem disponível os gráficos.

O que se vê na Figura 12 é que tanto o comprimento livre quanto o peso diminuem com o aumento do índice de mola. No geral, molas menores e mais leves são preferíveis, porém isso dependerá do tipo de projeto que estará sendo executado, então caso não exista nenhuma limitação de projeto o recomendado é que o usuário escolha aquela mola, dentre as aprovadas, que tenha o maior valor de C , para assim ter um menor custo.

Para a Figura 13 o raciocínio é análogo ao caso anterior, o recomendado é que se escolha a mola com o maior valor de C , pois quanto maior a folga igualmente maior será a garantia de que as espiras não se atritarão com as paredes do furo. Como a diferença entre as folgas do menor com o maior valor de índice de mola é pequeno então não terá a preocupação de escolher o maior C e correr o risco da mola ter “jogo” dentro do furo, mesmo porque elas já foram testadas para o caso de falha por flambagem.

Diferentemente dos gráficos analisados anteriormente o último da Figura 14 mostra um decaimento do CS com o aumento do C , o que obviamente não é algo requerido.

É importante lembrar que escolhendo a mola aprovada com o maior C resultará nos menores CS possíveis, porém mesmo assim a mola ainda estará aprovada, por isso mantem-se a recomendação da escolha da mola de maior C , ou pelo menos a mola com o segundo ou terceiro maior C , dependendo da situação, pois assim garantirá que ele terá uma mola ao mesmo tempo segura e barata.

5 CONCLUSÃO

Com esse trabalho o aluno poderá ver que para um mesmo projeto pode ter mais de uma mola aprovada, o que muitas vezes não é percebido apenas fazendo exercícios em sala de aula, pois uma vez que ele escolheu um valor de índice de mola C adequado ele finaliza o exercício, além do que pode constatar que mola aprovada não necessariamente significa mola ideal podendo assim desenvolver técnicas para poder alcançar um melhor resultado como mudando o valor do d ou usando os gráficos, como explicado anteriormente.

Por conta desse exercício de raciocínio feito pelo aluno através do programa que ele é altamente recomendável para eles, afinal o programa não irá estudar por ele e sim dar suporte e servir como apoio e consulta para o mesmo, fazendo com que ele não apenas estude da forma mais correta e rápida, mas também que enxergue os projetos futuros como algo além do “aprovado” ou “reprovado”.

Pela fidelidade dos resultados, praticidade e fácil interpretação do Excel o programa acaba sendo uma ferramenta atrativa para o público alvo, mesmo porque quase todos os alunos de engenharia que chegam para fazer um projeto de mola já tiveram algum contato com o Excel, e na pior das hipóteses em que um aluno não teve nenhum contato com o mesmo ele rapidamente conseguirá manipular o programa, pois ele foi desenvolvido de forma que todos os espaços para dados de entradas e avisos sejam feitos de forma bem clara e didática.

O programa infelizmente não conseguirá prever que o aluno coloque por descuido algum dado errado, seja em termos de unidade ou ordem de grandeza, pois tomar esses tipos de cuidado faz parte de seu aprendizado, afinal em uma prova ele deverá tomar esses tipos de precauções, pois como dito anteriormente o programa não serve para ensiná-lo e sim para auxiliá-lo.

REFERÊNCIAS

WAHL A.M.. **Mechanical springs**. Nova York: McGraw-Hill, 1963

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. 9

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. 931 p.

JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 500p.

SHIGLEY, J. E. **Elementos de máquinas**. 3.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984. 2v.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 670p.

JELLEN, B.; SYRSTAD, T. **VBA e macros: Microsoft Office Excel 2013**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2014. 608p.

MELCONIAN, S. **Elementos de máquinas**. 3.ed. São Paulo: Érica Ltda., 1995. 342p.

NIEMANN, G.; OTTO, A. R. **Elementos de máquinas**. São Paulo: Edgard Blücher: EDUSP, 1971 3v.

PIRES, O. A. L. **Elementos de máquinas**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980. 445p.

PROVENZA, F. **Projetista de máquinas**. 5.ed. São Paulo: Pro-Tec, 1978. 1v.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. Russell. **Resistência dos materiais**. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1989. 654p.