

RAFAEL BARBOSA SILVA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MOLAS HELICOIDAIS DE
COMPRESSÃO

RAFAEL BARBOSA SILVA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MOLAS HELICOIDAIS DE
COMPRESSÃO

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

2016

S586e	<p>Silva, Rafael Barbosa</p> <p>Estudo do comportamento mecânico de molas helicoidais de compressão / Rafael Barbosa Silva – Guaratinguetá, 2016. 60 f : il. Bibliografia: f. 60</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016. Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva</p> <p>1. Molas (Mecanismo) 2. Metalografia 3. Força compressiva 4. Peças de maquinas I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 62-272</p>
-------	---

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MOLAS HELICOIDAIS DE
COMPRESSÃO**

RAFAEL BARBOSA 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

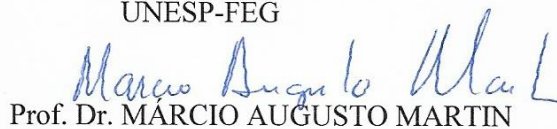
BANCA EXAMINADORA:



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



Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI
UNESP-FEG



Prof. Dr. MÁRCIO AUGUSTO MARTIN
UNESP-FEG

Outubro de 2016

DADOS CURRICULARES

RAFAEL BARBOSA SILVA

NASCIMENTO	06.05.1991 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	José Alves da Silva Segundo Maria Nilda Barbosa Santos Silva
2010/2016	Curso de Graduação Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, antes de mais nada, aos meus pais *José e Maria* pelo apoio em todos os momentos ao longo dos últimos anos. Sem eles, nem essa e nem outras oportunidades seriam reais;

a cada um dos professores que compartilhou comigo um pouco de seu conhecimento nessa jornada, sempre com muita dedicação e competência;
um agradecimento especial ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo e Silva*, pela interminável paciência, apoio, amizade e instrução, fundamentais no desenvolvimento deste trabalho;

aos técnicos dos Departamentos de Materiais e Mecânica, e ao *Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein* pela disposição e atenção que me foi emprestada para a realização deste trabalho;

aos funcionários da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela presteza, dedicação e principalmente pela vontade de ajudar;

à minha namorada, *Gabriella*, pelo apoio e carinho, sem os quais este trabalho não estaria finalizado;

de modo especial a todos os moradores e agregados da República Mocó, que tanto contribuíram fortemente para o meu desenvolvimento pessoal e profissional;

por fim, agradeço a Deus pela oportunidade de viver a realização de mais um sonho, e a todos aqueles que, de alguma forma me ajudaram a completar esta etapa e não foram citados.

DEDICATÓRIA

De modo especial, aos meus pais, José e Maria, pelo incentivo e apoio incondicional.

EPÍGRAFE

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem uma penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

Theodore Roosevelt

RESUMO

O objetivo deste trabalho é estabelecer formas confiáveis de reproduzir, em ambiente computacional, molas de compressão de modo funcional, visando o estudo de suas diversas propriedades. Para atingir tal objetivo, adotaram-se três molas de prova de dimensões similares, porém diferentes entre si para o estudo. O primeiro passo foi a identificação das necessidades desse projeto. Dessa forma, identificou-se que, além das dimensões das molas de prova; seriam também necessárias propriedades referentes ao material das molas, bem como uma forma de comprovar os resultados obtidos nas simulações. Assim, após as medições, foram realizados os ensaios de compressão de cada uma das molas, para que fossem então realizados os ensaios metalográfico e de dureza, que exigiam danificar os corpos de prova permanentemente através de corte para extração de amostras. A última etapa a ser então apresentada tratou de analisar os dados obtidos, identificando o que corresponde ou não com a finalidade desejada, e sugerindo melhorias a serem adotadas por trabalhos futuros que possam vir a utilizar este texto como base.

PALAVRAS CHAVES: Molas de compressão. Metalografia. Ensaio de compressão. Elementos de máquinas.

ABSTRACT

The present work aims to establish reliable ways of playing in computing environment, the behavior of compression springs, for the study of its various properties. To achieve this goal, were used three proof springs of similar dimensions, but different from each other for the study. The first step was to identify the needs of this project. Thus, it was found that, beyond the dimensions of the test springs; other properties would also be required concerning the material of the springs as well as a way to verify the results obtained from simulations. Thus, after the measurement, the compression test of each of the springs were carried out, to be then carried hardness and the metallographic tests, requiring to damage the springs by cutting them for extracting samples. The final step, then, was to analyze the obtained data, identifying which corresponds or not to the desired purpose and suggesting improvements to be adopted for future work which might use this text as a base.

KEYWORDS: Compression springs. Metallography. Compression test. Machine design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de molas helicoidais de compressão.....	15
Figura 2 - Resistências mínimas à tração de fios de mola de aço geradas a partir da equação (4) e da tabela 1.	17
Figura 3 - Parâmetros dimensionais para molas helicoidais de compressão.....	18
Figura 4 - Comprimentos de estudo de uma mola helicoidal de compressão.	19
Figura 5 - Tipos de extremidades das molas helicoidais de compressão: (a) extremidades simples, (b) extremidades simples e esmerilhadas, (c) extremidades esquadrejadas e (d) extremidades esquadrejadas e esmerilhadas.....	19
Figura 6 - Corpo de prova embutido	23
Figura 7 - Molas de prova.....	25
Figura 8 – Paquímetro utilizado na medição: (a) inteiro, (b) detalhe.....	27
Figura 9 - Máquina utilizada nos ensaios de compressão: (a) A máquina, (b) Detalhe no controle manual da máquina.....	29
Figura 10 - Célula de carga de 10kN para equipamentos Shimadzu para ensaio de compressão.	30
Figura 11 - (a) Computador ligado à máquina do ensaio de compressão e (b) tela do software utilizado pelo equipamento.....	31
Figura 12 - (a) Suporte usinado para o ensaio de compressão, (b) montagem com os suportes	32
Figura 13 - (a) Arranjo experimental, (b) arranjo experimental com aparato de segurança.	32
Figura 14 - Gráfico Carga x Deslocamento do ensaio de compressão da mola cinza.....	34
Figura 15 - Gráfico Carga x Deslocamento do ensaio de compressão da mola amarela.	34
Figura 16 - Gráfico Carga x Deslocamento do ensaio de compressão da mola vermelha.	35
Figura 17 – (a) Mola Cinza presa ao suporte de corte; (b) Mola amarela após seu corte; (c) Corte da mola amarela e (d) Corte da mola amarela.	37
Figura 18 - (a) Equipamento utilizado para o embutimento e (b) mola amarela após o embutimento.	38
Figura 19 - (a) Politriz em funcionamento com uma das amostras	39
Figura 20 - (a) Amostras prontas para o ataque em nital, (b) Frasco contendo Nital (3%)	40
Figura 21 - Micrografia, mola cinza.....	41
Figura 22 - Micrografia, mola amarela.....	41
Figura 23 - Micrografia, mola vermelha.	42
Figura 24 - (a) Equipamento do ensaio de dureza e (b) amostras utilizadas.....	43
Figura 25 – Mola Vermelha já submetida às condições de contorno e à carga final do ensaio de compressão (974,86N).	48
Figura 26 - (a) Malha da mola cinza, (b) malha da mola amarela e (c) malha da mola vermelha.	49
Figura 27 – Deformação em modelo computacional: (a) Mola cinza, (b) Mola amarela e (c) Mola vermelha.....	51
Figura 28 – Gráfico dos coeficientes de segurança contra escoamento, mola cinza.....	53
Figura 29 – Gráfico dos coeficientes de segurança contra escoamento, mola amarela.....	54
Figura 30 – Gráfico dos coeficiente de segurança contra escoamento, mola vermelha.....	54
Figura 31 - Gráfico dos efeitos da variação do índice de mola, mola cinza.....	56

Figura 32 - Gráfico dos efeitos da variação do índice de mola, mola amarela.	56
Figura 33 - Gráfico dos efeitos da variação do índice de mola, mola vermelha.	57

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	MOLAS	14
2.1.1	Constante de Mola	14
2.1.2	Tipos de Mola	15
2.1.3	Materiais	16
2.1.4	Molas helicoidais de Compressão	18
2.2	METALOGRAFIA	21
2.2.1	Microscopia ótica	22
2.2.2	Corpo de prova	22
2.2.3	Corte	23
2.2.4	Preparação da superfície	23
2.2.5	Ataque Químico	24
3.	METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	25
3.1	MOLAS DE PROVA	25
3.2	MEDIÇÕES	26
3.2.1	Metodologia	26
3.2.2	Equipamento Utilizado	26
3.2.3	Medidas	27
3.3	ENSAIO DE COMPRESSÃO	29
3.3.1	Equipamentos Utilizados	29
3.3.2	Dados obtidos	33
3.4	METALOGRAFIA	36
3.4.1	Corte e embutimento	36
3.4.2	Embutimento	38
3.4.3	Lixamento e Polimento	39
3.4.4	Microscopia	40
3.5	ENSAIO DE MICRODUREZA	42
4.	ANÁLISE TEÓRICA	44
4.1	CONDIÇÕES DE CONTORNO	44
4.2	DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE MOLA	45

5.	ANÁLISE COMPUTACIONAL	47
5.1	DESENHO DAS MOLAS.....	47
5.2	PRÉ-PROCESSAMENTO.....	47
5.2.1	Aplicação da carga	47
5.2.2	Malha	49
5.2.3	Análise e resultados	50
6.	DISCUSSÃO	52
6.1	COEFICIENTES DE MOLA: EXPERIMENTAL, TEÓRICO E COMPUTACIONAL.....	52
6.2	COEFICIENTE DE SEGURANÇA CONTRA ESCOAMENTO – SIMULAÇÃO x ANÁLISE TEÓRICA.....	53
6.3	EFEITOS DA VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE MOLA.....	55
7.	CONCLUSÃO	58
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

Praticamente qualquer parte feita de um material elástico possui alguma ‘mola’ dentro de si. O termo mola se refere a partes construídas em configurações particulares para prover um intervalo de força dentro de um espaço significativo de deflexão e/ou para armazenar energia potencial. Molas são projetadas para provar uma força de tração, compressão ou um torque ou principalmente guardar energia, e podem ser divididas nessas quatro categorias gerais. Dentro de cada categoria, muitas configurações de molas são possíveis. Molas podem ser feitas de fio redondo ou retangular dobrado em alguma forma adequada como de espira, ou feitas de uma barra plana carregada como uma viga. Muitas configurações padronizadas para molas estão disponíveis como itens de estoque em catálogos de fabricantes de molas. É geralmente mais econômico para o projetista utilizar uma mola de catálogo, se possível. Algumas vezes, contudo, a tarefa requer uma mola projetada segundo as necessidades do cliente. Essas molas podem desenvolver funções secundárias, tais como localização ou montagem de componentes. Em todo caso, o projetista deve entender, e utilizar apropriadamente, a teoria de molas a fim de que possa especificar ou projetar a peça. (NORTON, 2004, p. 693)

Diversas propriedades podem influenciar o comportamento de molas, e um livro poderia ser escrito a respeito. Neste trabalho, serão analisadas algumas das propriedades de sua geometria, bem como do material de fabricação que julgamos mais importantes para a análise do comportamento mecânico. As molas escolhidas foram as molas helicoidais de compressão.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é analisar o comportamento mecânico de molas helicoidais de compressão, por meio de comparações entre resultados experimentais e análises teóricas.

Para tal, o trabalho deverá determinar de forma confiável, através dos métodos disponíveis, os materiais utilizados na fabricação dos corpos de prova, e obter resultados confiáveis entre si, para que ao replicar as condições de contorno em ambiente computacional, ou em análise teórica, a variação das propriedades gere situações confiáveis para análise.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MOLAS

De acordo com Arcanjo (2008), molas são elementos capazes de sofrer deformação elástica, armazenando energia potencial elástica. São então muito utilizados em elementos de máquinas pela sua capacidade de exercer força e fornecer flexibilidade, e para armazenar ou absorver energia.

Assim, em arranjos mecânicos podem atuar de diversas maneiras, e aparecer em diversos formatos ou arranjos entre si, de acordo com sua função. Neste trabalho, a ênfase se dá em molas helicoidais de compressão.

2.1.1 Constante de Mola

A constante da mola (k) trata-se da propriedade mais importante de uma mola, já que a mesma se trata da inclinação da carga aplicada pela deformação da mola. Caso essa inclinação seja constante, a mola é linear, e k é definido pela equação (1).

$$k = \frac{F}{d} \quad (1)$$

Onde F é a carga aplicada, e d é o deslocamento ou deflexão. Logo, para o caso de molas não-lineares, o valor de k pode variar com a deflexão.

2.1.1.1 Molas Combinadas

A combinação de várias molas pode se dar por meio de arranjos em série ou em paralelo. Para arranjos em série, a força em todas as molas é a mesma, e cada uma tem sua parcela de contribuição para a deformação total. O valor de k para este tipo de arranjo é definido pela equação (2).

$$k_{total} = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n \quad (2)$$

Para molas arranjadas em paralelo, no entanto, a força é dividida, e o que as molas do arranjo tem em comum é um mesmo deslocamento. O valor de k , nesse caso, é definido pela equação (3).

$$\frac{1}{k_{total}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (3)$$

2.1.2 Tipos de Mola

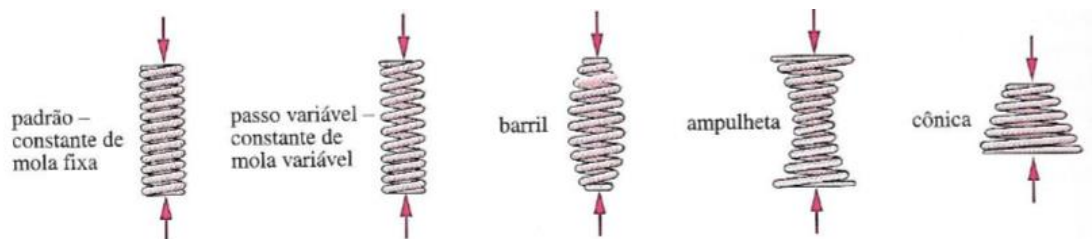
Molas podem ser classificadas de diversas formas. A classificação que ilustraremos aqui considera a configuração física da mola.

1. Molas de fio: São os tipos mais comuns de molas encontradas, caracterizadas por um fio ou arame com geometria que possibilita o armazenamento de energia potencial elástica. Podem ser:
 - a. Helicoidais de compressão;
 - b. Helicoidais de tração;
 - c. Helicoidais de torção.

Dentre outras formas encomendadas.

2. Molas planas: Molas planas, que são geralmente do tipo em balanço ou vigas biapoiadas, e podem ter diferentes formas.
3. Molas helicoidais de compressão podem se apresentar de diferentes modos, a figura 1 mostra alguns deles.

Figura 1 - Tipos de molas helicoidais de compressão.



Fonte: (NORTON, 2004)

2.1.3 Materiais

A escolha do material ideal para uma mola depende intimamente de sua geometria e outras características de sua configuração. Dessa forma, podemos concluir também que há uma gama limitada de materiais que podem atender às especificações de cada aplicação.

Segundo Norton (2004), para que um material seja considerado ideal para a fabricação de molas, deve ter uma alta resistência à tração, alto ponto de escoamento, e baixo módulo de elasticidade, pois é necessário que o mesmo proporcione máximo armazenamento de energia. Se for considerado carregamento cíclico, devem ser também consideradas propriedades relacionadas com a resistência à fadiga.

Os materiais utilizados em molas são geralmente endurecidos para obtenção da resistência adequada. Pequenas seções são encruadas em um processo de repuxamento a frio. Seções grandes sofrem geralmente tratamento térmico. Utilizam-se a tratamentos térmicos de baixa temperatura (175 a 510 °C) após a conformação para aliviar tensões residuais e estabilizar dimensões, até mesmo em partes de pequenas seções. Têmpera a alta temperatura seguida de revenimento é utilizada para endurecer grandes molas que devem ser conformadas na condição recozida. (NORTON, 2004, p. 697)

O trecho acima torna-se então útil para justificar grandes variações em propriedades ligadas a molas que, a princípio, parecem semelhantes entre si.

2.1.3.1 Arame de mola

A escolha do material, como dito anteriormente, está intimamente ligada a fatores como aplicação e configuração física. Dessa forma, analisa-se amplamente o arame de seção circular, que é o material mais utilizado em molas, e por isso encontra-se disponível em uma grande variedade de ligas e tamanhos.

Dessa forma, deve-se estudar de forma mais detalhada o que ocorre com materiais de seção pequena. Para tal, sabendo-se que a resistência do arame da mola depende do diâmetro do fio, tem-se a equação (4).

$$S_{ut} = A \times d^b \quad (4)$$

Onde A e b são definidos pela tabela 1, para os materiais comuns utilizados na fabricação de molas.

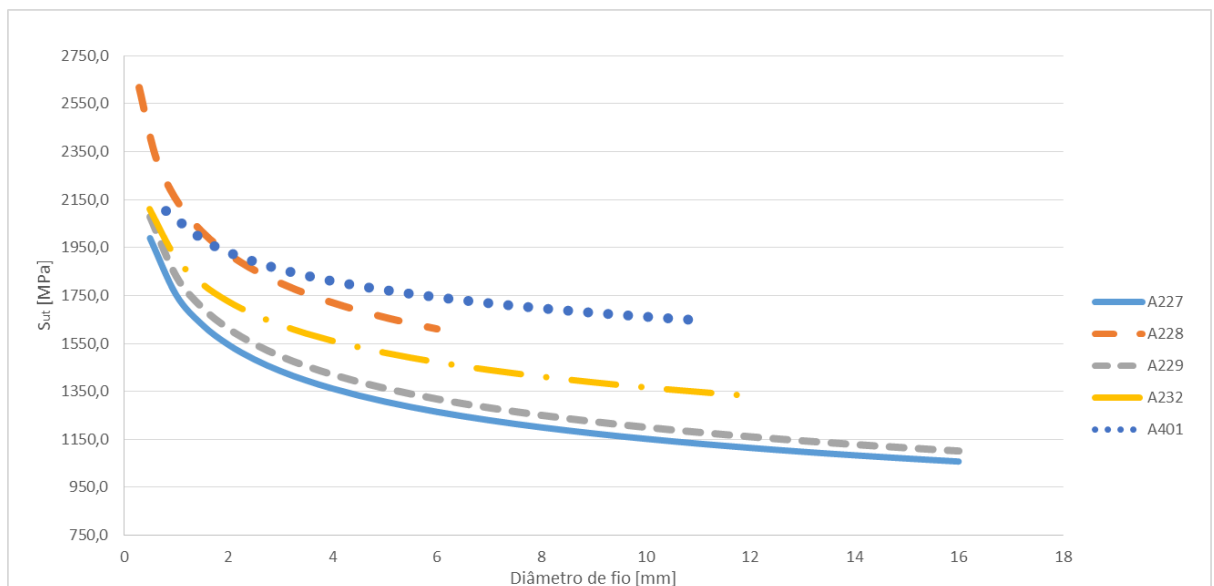
Tabela 1 - Coeficientes e expoentes para a equação (4).

Nº ASTM	Material	Intervalo [mm]	Expoente b	Coefficiente A [MPa]
A227	Repuxado a frio	0,5 – 16	-0,1822	1753,3
A228	Fio musical	0,3 – 6	-0,1625	2153,5
A229	Revenido em óleo	0,5 – 16	-0,1833	1831,2
A232	Cromo-v	0,5 – 12	-0,1453	1909,9
A401	Cromo-s	0,8 - 11	-0,0934	2059,2

Fonte: Autor

Ressalta-se então que os valores de A e b na tabela são empíricos e válidos para os intervalos especificados. O gráfico resultante com as funções para cada um dos materiais listados, em seus intervalos foi confeccionado com o auxílio do software Microsoft Excel, e é mostrado a na figura 2.

Figura 2 - Resistências mínimas à tração de fios de mola de aço geradas a partir da equação (4) e da tabela 1.

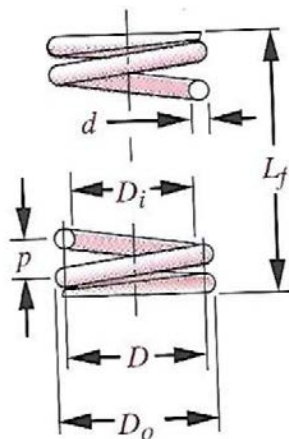


Fonte: Autor

2.1.4 Molas helicoidais de Compressão

Os parâmetros dimensionais mais importantes para o estudo de molas helicoidais de compressão, utilizados para defini-las, são mostrados na figura 3.

Figura 3 - Parâmetros dimensionais para molas helicoidais de compressão.



Fonte: (NORTON, 2004)

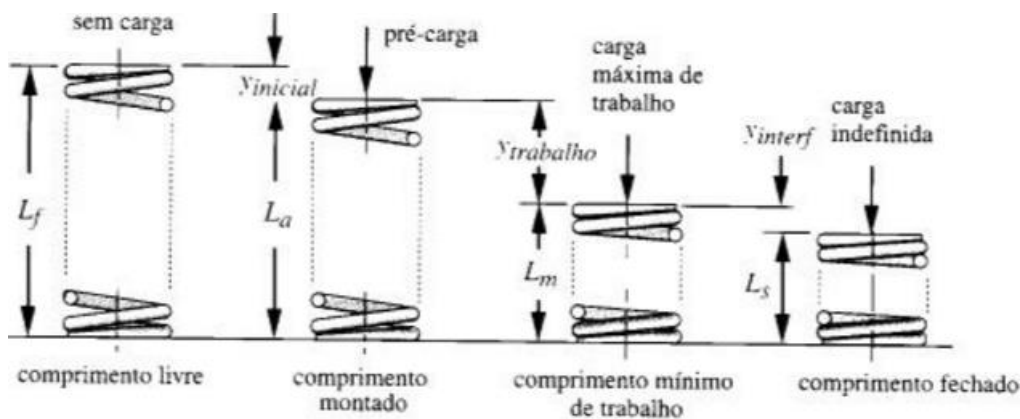
Sendo,

- Diâmetro do fio, d
- Diâmetro médio da espira, D
- Comprimento livre, L_f
- Número de espiras, N_t
- Passo de espiras, p

2.1.4.1 Comprimento de molas

Podem ser estudadas diversas deflexões das molas de compressão. A figura 4 mostra quais são elas.

Figura 4 - Comprimentos de estudo de uma mola helicoidal de compressão.

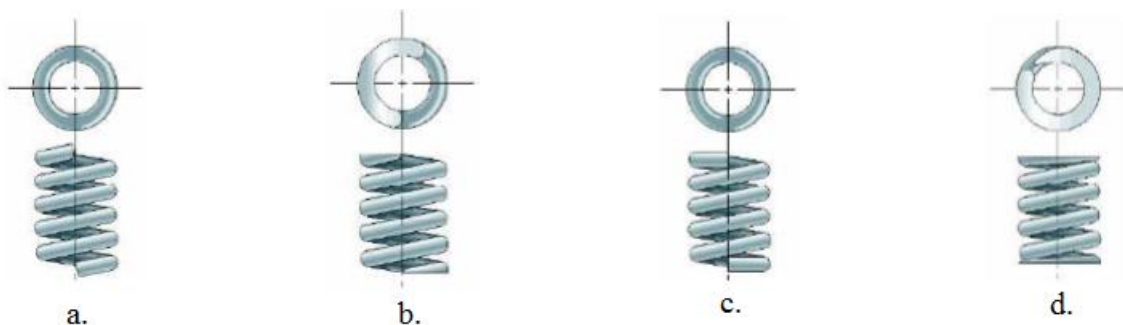


Fonte: (NORTON, 2004)

2.1.4.2 Detalhes de extremidade

Quatro tipos de extremidade são estudadas para molas helicoidais de compressão, e que afetam o número de espiras ativas a serem consideradas, conforme é mostrado na figura 5.

Figura 5 - Tipos de extremidades das molas helicoidais de compressão: (a) extremidades simples, (b) extremidades simples e esmerilhadas, (c) extremidades esquadrejadas e (d) extremidades esquadrejadas e esmerilhadas.



Fonte: (ARCANJO, 2008)

Segundo Norton (2004), número total de espiras N_t pode ou não contribuir para a deflexão dependendo do tratamento de extremidade. Utiliza-se o número de espiras ativas N_a para realizar os cálculos. Para cada um dos casos, os cálculos são feitos da seguinte forma:

a) $N_a = N_t$

$$b) N_a = N_t - 1$$

$$c) N_a = N_t - 2$$

$$d) N_a = N_t - 2$$

Sendo a numeração de “a” a “d” a mesma utilizada na figura 5.

2.1.4.3 Índice de mola

O índice de mola, C, é a razão entre o diâmetro médio da espira, e o diâmetro do fio:

$$C = \frac{D}{d} \quad (5)$$

O valor de C é importante no projeto de uma mola, já que seu valor deve estar entre 4 e 12, sendo $C < 4$ um indicador de que a mola será de difícil fabricação, enquanto $C > 12$ significa que a mola terá alta propensão à flambagem. Pode-se então concluir que quanto menor o valor de C, mais difícil é a deflexão da mola estudada.

2.1.4.4 Deflexão de mola

A deflexão de uma mola helicoidal de compressão é dada pela equação (6):

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

Onde,

- F é a força axial aplicada na mola
- D é o diâmetro médio das espiras
- d é o diâmetro do fio
- N_a é o número de espiras ativas
- G é o módulo de cisalhamento do material

2.1.4.5 Constante de mola

Uma equação para o cálculo da constante de mola é obtida pelo rearranjo da equação de deflexão, conforme a equação (7):

$$k = \frac{F}{y} = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \quad (7)$$

2.1.4.6 Tensões em espiras de molas helicoidais de compressão

Na seção transversal de uma espira existem duas componentes: torque e tensão de cisalhamento devido a força cortante. Assim:

$$\tau_{max} = \frac{Tr}{J} + \frac{F}{A} = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad (8)$$

Substituindo a expressão do índice de mola C:

$$\tau_{max} = \frac{8FD}{\pi d^3} \left(1 + \frac{0,5}{C}\right) \quad (9)$$

Onde,

$$\tau_{max} = \frac{8FD}{\pi d^3} K_s \quad (10)$$

E,

$$K_s = 1 + \frac{0,5}{C} \quad (11)$$

O fator K_s é chamado de fator de cisalhamento direto.

2.2 METALOGRAFIA

Um dos problemas mais interessantes da avaliação de micro e macroestruturas de metais é o fato de que, na maioria das vezes, as técnicas analíticas disponíveis permitem a observação de seções bidimensionais de estruturas que têm características tridimensionais. Esta transformação aparentemente simples requer cuidados especiais na aplicação da técnica metalográfica. Estes cuidados vão desde a seleção das seções a estudar até a avaliação criteriosa dos resultados obtidos na avaliação destas seções. Embora técnicas de reconstrução tridimensional já venham sendo aplicadas ao estudo da estrutura metalográfica, este tipo de análise ainda requer um investimento considerável de recursos e preparação de planos sucessivos de amostragem, mas já existem diversas outras técnicas que possibilitam recomposição tomográfica automática. Algumas destas técnicas já vêm sendo empregadas em aços. (COLPAERT, 2008, p. 26)

2.2.1 Microscopia ótica

De acordo com Colpaert (2008), dentre as diversas técnicas de observação das microestruturas de aços e ferros fundidos, microscopia ótica é a mais comum.

Trata-se de uma técnica na qual a amostra a ser estudada necessita passar por alguns procedimentos básicos, de preparação, para que a mesma bastante plana e perpendicular ao eixo ótico do microscópio.

Tais procedimentos consistem em, a princípio, obter uma geometria possível de ser trabalhada, muitas vezes necessitando que uma amostra da peça seja cortada, para que se obtenha uma superfície de trabalho.

2.2.2 Corpo de prova

Consiste em uma parte do material a ser estudado. Tendo em vista que a metalografia visa, em geral, o estudo de materiais de fabricação de elementos de máquinas e outras peças, muitas vezes seu estudo é dificultado por causa da geometria da mesma. Assim, escolhe-se o local com o qual se deseja trabalhar, e a partir daí é retirada uma amostra de material a ser utilizada.

O tamanho da amostra deve levar em conta um tamanho de fácil manuseio, além do peso limite suportado pelo porta amostras do microscópio utilizado. Dessa forma, uma amostra pode se apresentar dos seguintes jeitos:

- Embutido: O corpo de prova pode ser embutido de forma a facilitar o manuseio de peças pequenas, o embutimento pode ser a quente ou a frio.
- Não embutido: Ocorre quando o corpo de prova tem dimensões suficientemente grandes para que possam ser manuseados sem serem embutidos.

Um exemplo de corpo de prova embutido é mostrado na figura 6.

Figura 6 - Corpo de prova embutido



Fonte: Autor

2.2.3 Corte

Tendo em vista que, como anteriormente citado, o ensaio geralmente visa estudar o material de fabricação de algum produto, muitas vezes, é necessário cortar esse produto para dar origem aos corpos de prova. Para tal, na vasta maioria das vezes é necessário tomar alguns cuidados. Dessa forma é essencial que se escolham de forma adequada as ferramentas de corte, para que o equipamento de corte não seja danificado, e que a microestrutura da amostra não seja danificada pelo calor, por exemplo.

2.2.4 Preparação da superfície

Para que a superfície escolhida fique suficientemente plana, na preparação clássica, citada por Colpaert (2008), são adotados os seguintes procedimentos:

- a. Lixamento: pode ser feito manualmente, ou por meio de lixadeiras motorizadas. A amostra passa por sucessivas lixas, de acordo com o resultado que se deseja, antes de ser submetida ao polimento.

- b. Polimento: é mais comumente utilizado um disco giratório de feltro, sobre o qual se aplica uma leve camada de abrasivo, este podendo ser alumina, diamante, sílica ou outros, menos utilizados.

2.2.5 Ataque Químico

O ataque químico visa facilitar a identificação de detalhes da microestrutura, e contorno dos grãos. Para tal, é escolhido um reagente adequado ao material de estudo, e do objetivo das imagens a serem obtidas pelo microscópio.

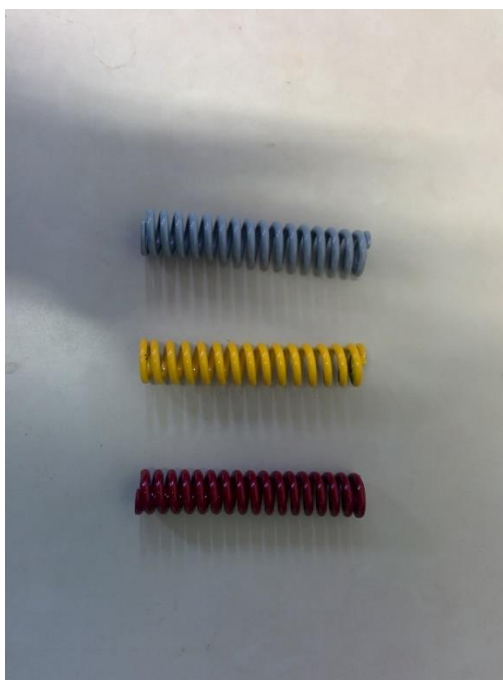
3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de reunir informações suficientes a respeito dos materiais de fabricação das molas, foram realizados diversos ensaios experimentais, para que seja decidida a influência das informações acessíveis, bem como a determinação das propriedades mecânicas do material da mola para uma análise mais completa e confiável.

3.1 MOLAS DE PROVA

Para a realização dos estudos, foram utilizadas três molas de prova diferentes entre si, com o intuito de prover base de comparação. Tratam-se de molas para aplicação em suspensão de bicicleta adquiridas sem maiores informações a respeito de sua fabricação ou especificações. Os corpos de prova são mostrados na figura 7.

Figura 7 - Molas de prova.



Fonte: Autor

As molas são também de cores diferentes, sendo elas cinza, amarela e vermelha. Para o estudo, as nomearemos conforme as cores: Mola Cinza, Mola Amarela e Mola Vermelha.

3.2 MEDIÇÕES

As medições se deram no laboratório de Metrologia do DMT da FEG/UNESP, onde verificou-se o melhor modo de aferir as medidas dos corpos de prova.

Optou-se por utilizar um paquímetro ao considerar as dificuldades encontradas para a utilização do projetor de perfis, e a boa precisão que o paquímetro disponível pôde fornecer.

3.2.1 Metodologia

Considerando o pouco que se sabe a respeito da fabricação dos corpos de prova, a metodologia utilizada para a medição dos corpos de prova foi a aferição de cada uma das medidas de três pontos distintos em sua geometria, com a finalidade de obter uma média por meio desses valores, que será utilizada na modelagem computacional dos corpos de prova.

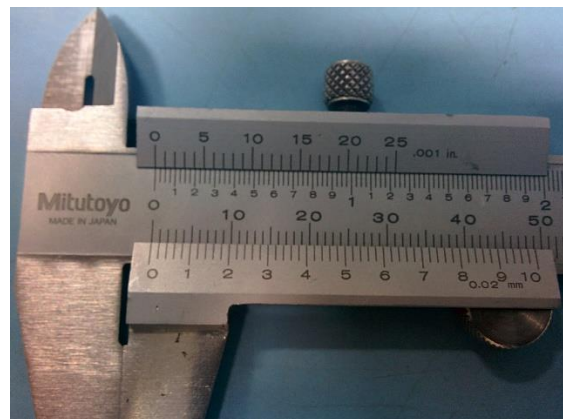
3.2.2 Equipamento Utilizado

Utilizou-se para a medição o paquímetro Mitutoyo Série 530-104B-10. O equipamento é mostrado na figura 8.

Figura 8 – Paquímetro utilizado na medição: (a) inteiro, (b) detalhe



(a)



(b)

Fonte:

Autor

Para maiores informações a respeito do equipamento, basta acessar o catálogo contido no site da empresa através do endereço que consta nas referências bibliográficas deste trabalho.

3.2.3 Medidas

As medições aferidas são mostradas nas tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 - Medições para a mola cinza.

<i>Mola Cinza</i>	1	2	3	Média
Diâmetro externo (mm)	19,92	19,90	19,94	19,92
Diâmetro interno (mm)	13,06	13,08	13,10	13,08
Altura (mm)	94,34	94,36	94,36	94,35
Diâmetro do fio (mm)	3,60	3,54	3,50	3,55
p' (mm)	2,70	2,56	2,60	2,62
p'ext. (mm)	1,50	1,42	1,46	1,46
Passo (mm)	6,17			
Passo ext. (mm)	5,01			

Fonte: Autor

Tabela 3 - Medições para a mola amarela.

<i>Mola Amarela</i>	1	2	3	Média
Diâmetro externo (mm)	19,08	19,08	19,08	19,08
Diâmetro interno (mm)	11,80	11,78	11,78	11,79
Altura (mm)	92,95	94,33	93,28	93,52
Diâmetro do fio (mm)	3,42	3,50	3,46	3,46
p' (mm)	3,34	3,30	2,98	3,21
p'ext. (mm)	1,20	1,58	1,60	1,46
Passo (mm)	6,67			
Passo ext. (mm)	4,92			

Fonte: Autor

Tabela 4 - Medições para a mola vermelha.

<i>Mola Vermelha</i>	1	2	3	Média
Diâmetro externo (mm)	18,86	18,96	18,92	18,91
Diâmetro interno (mm)	11,10	11,20	11,18	11,16
Altura (mm)	96,18	96,44	96,32	96,31
Diâmetro do fio (mm)	3,90	3,84	3,88	3,87
p' (mm)	2,00	1,96	1,88	1,95
p'ext (mm)	1,20	1,18	1,18	1,19
Passo (mm)	5,82			
Passo ext. (mm)	5,06			

Fonte: Autor

Onde p' é a distância entre as espiras ao longo do corpo da mola, e p'_{ext} é a distância entre as espiras nas extremidades de cada mola, necessária pela diferença no passo nas extremidades das molas de prova. Esse foi o método utilizado para conseguir medir o valor do passo utilizando um paquímetro, já que esse valor, mais o diâmetro do fio da mola resulta no passo da mola.

3.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO

O papel do ensaio de compressão neste trabalho é o de prover credibilidade aos ensaios computacionais, por meio da validação dos dados obtidos através do mesmo, que se faz necessária devido à escassez de informações referentes às molas de prova.

Foram então realizados ensaios de compressão nos mesmos parâmetros para os três corpos de prova. Os ensaios de compressão foram realizados no laboratório de ensaio de compressão, no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (UNESP).

3.3.1 Equipamentos Utilizados

Aqui serão descritos os materiais e equipamentos utilizados nos ensaios de compressão.

Os objetos de estudo deste trabalho são as três molas anteriormente descritas: mola cinza, mola amarela e mola vermelha.

O modelo da máquina de ensaio de compressão utilizado foi o AG-X, da marca Shimadzu, e é mostrado na figura 9. As especificações técnicas encontram-se na bibliografia desse trabalho.

Figura 9 - Máquina utilizada nos ensaios de compressão: (a) A máquina, (b) Detalhe no controle manual da máquina.



Fonte: Autor

Após os ensaios, o equipamento fornece relatórios de acordo com a necessidade do usuário, além de tabelas e gráficos ponto a ponto, possibilitando uma melhor análise dos dados gerados.

O primeiro ajuste feito foi a escolha da célula de carga. Através da observação do comportamento de outros corpos de prova, estimou-se que em nenhuma das molas de prova seria necessária uma força maior do que 10kN, valor correspondente à menor célula de carga disponível para o equipamento no laboratório. A escolha da célula de carga ideal é essencial, pois fornece uma melhor precisão e segurança ao ensaio. A célula de carga pode ser visualizada na figura 10.

Figura 10 - Célula de carga de 10kN para equipamentos Shimadzu para ensaio de compressão.

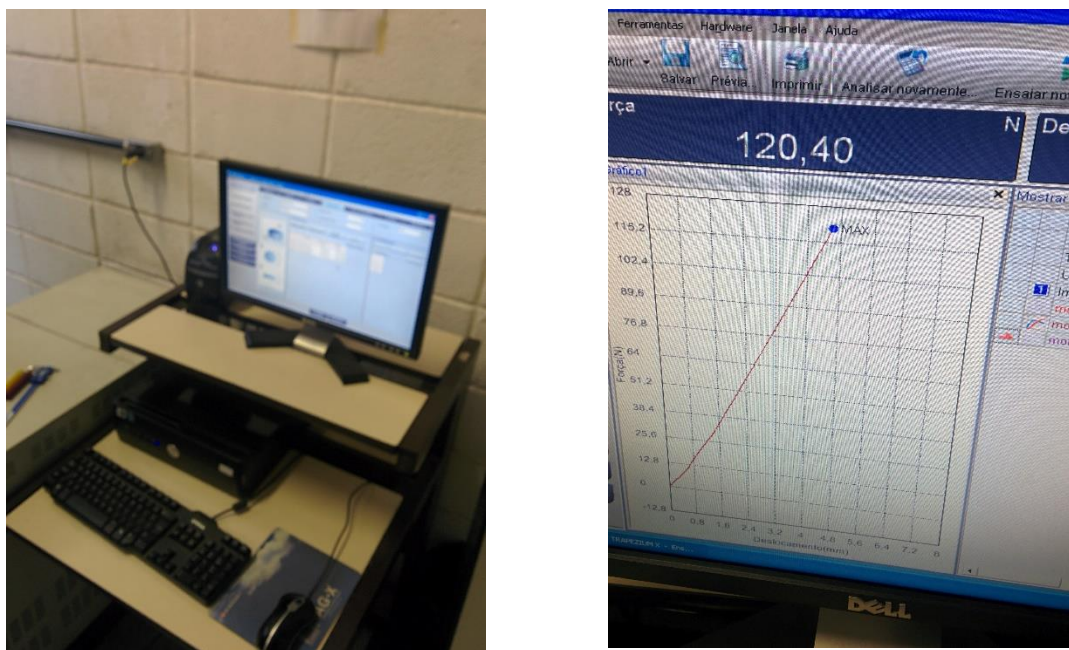


Fonte: Autor

O próximo passo para a configuração do equipamento foi definir os parâmetros que seriam estudados, para que o software TRAPEZIUM X gerasse os dados necessários para a nossa análise. Definiu-se aqui então que o software TRAPEZIUM X deveria gerar o gráfico da força pelo deslocamento.

A velocidade de compressão foi ajustada para 10mm/min, garantindo maior segurança para o ensaio, em paralelo a um tempo total aceitável até que as molas de prova atingissem a posição de mola fechada. Na figura 11 é mostrado o computador e o software que registram as medições do equipamento.

Figura 11 - (a) Computador ligado à máquina do ensaio de compressão e (b) tela do software utilizado pelo equipamento.



Fonte: Autor

Providências foram tomadas para minimizar o efeito de imperfeições do corpo de prova e, além disso, para melhorar a segurança do ensaio para os presentes no laboratório durante a sua realização.

Estes ajustes se fizeram necessários pois, embora as molas sejam todas retificadas em suas extremidades, não se pode garantir que estas superfícies não estão perfeitamente retificadas, nem alinhadas. Esse fato pode gerar descentralização do eixo da mola durante o ensaio, influenciando diretamente nos resultados obtidos via software.

Dessa forma, foram usinados suportes para as molas, de forma a garantir melhor alinhamento e centralização da mola durante o ensaio. Os suportes são mostrados na figura 12.

Figura 12 - (a) Suporte usinado para o ensaio de compressão, (b) montagem com os suportes



Fonte: Autor

Quanto à segurança, caso a compressão seja realizada com as extremidades descentralizadas, o corpo de prova pode ricochetear e pôr em risco estruturas e pessoas presentes no laboratório.

Embora este risco seja minimizado com o uso dos suportes, optou-se ainda pela utilização de um aparato para proteger a área de ensaio, ilustrado na figura 13.

Figura 13 - (a) Arranjo experimental, (b) arranjo experimental com aparato de segurança.



Fonte: Autor

3.3.2 Dados obtidos

Após o término dos ensaios, o software TRAPEZIUM X, instalado no computador ligado à máquina do ensaio de compressão gerou os relatórios com os dados obtidos. São fornecidos um relatório em formato “.doc”, para o software Microsoft Word, e outro em formato “.txt”, com os pontos do gráfico, para que possam ser tratados conforme a necessidade da análise.

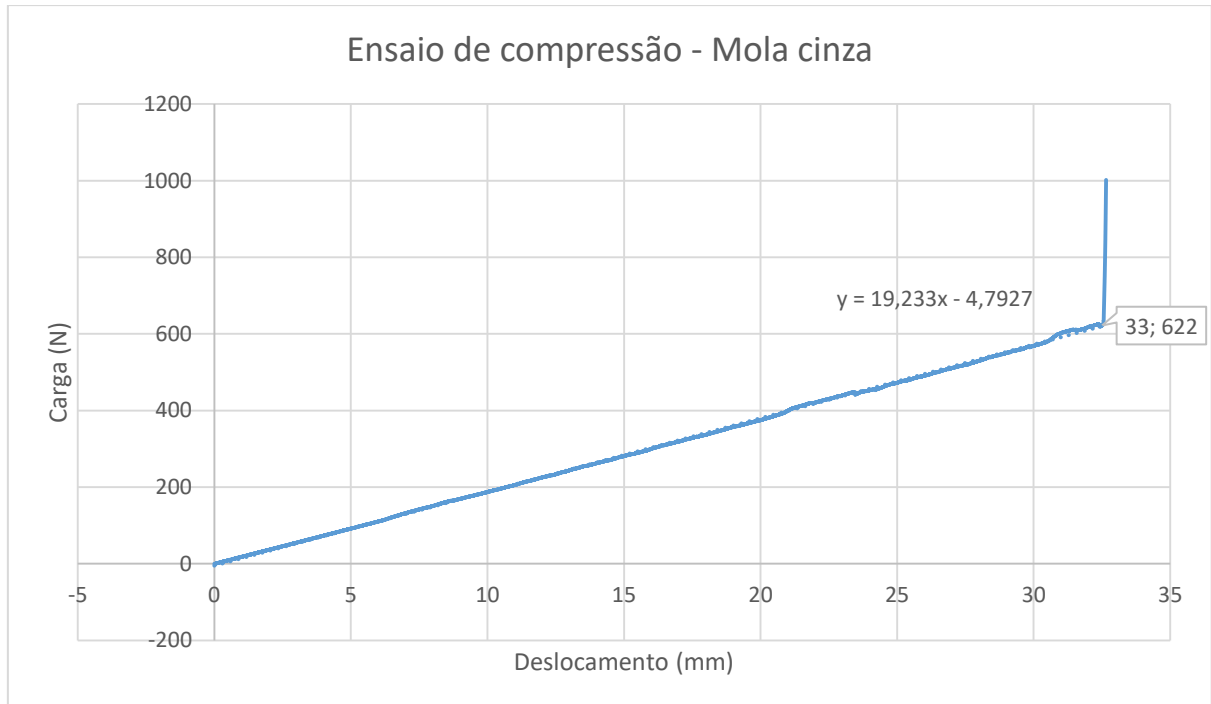
Para este caso, optou-se por tratar os dados do relatório que fornece o gráfico ponto a ponto, para conseguir assim utilizar os recursos do software Microsoft Excel em uma análise própria.

A respeito do gráfico, algumas observações se fazem necessárias. Primeiramente, nota-se uma mudança de padrão muito brusca a partir do ponto indicado em cada um dos gráficos. Isto se deve ao fato da máquina trabalhar com uma velocidade de compressão pré-estabelecida, logo, ao atingir a posição de mola fechada; a máquina passa a aumentar a força para conseguir alcançar a taxa de compressão. Como isto não é possível a partir deste ponto, a força aumenta até atingir a carga máxima, de acordo com a célula de carga. Quando isso ocorre, o equipamento interrompe o ensaio.

Utilizando os recursos do software Microsoft Excel, os dados foram tratados de forma a utilizar apenas pontos suficientes para ilustrar o comportamento após a posição de mola fechada. Além disso, o software também fornece a equação da linha de tendência, e o ponto onde a mola atinge a posição de mola fechada.

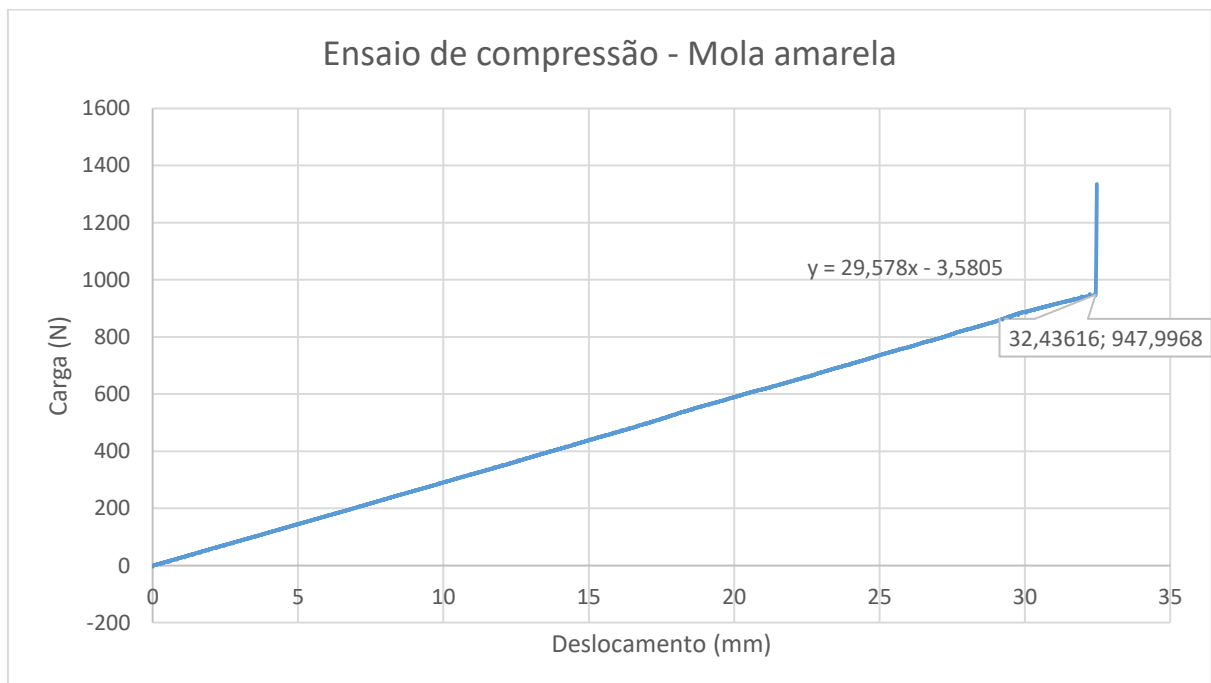
Os gráficos dos três ensaios são mostrados nas figuras 14, 15 e 16.

Figura 14 - Gráfico Carga x Deslocamento do ensaio de compressão da mola cinza.



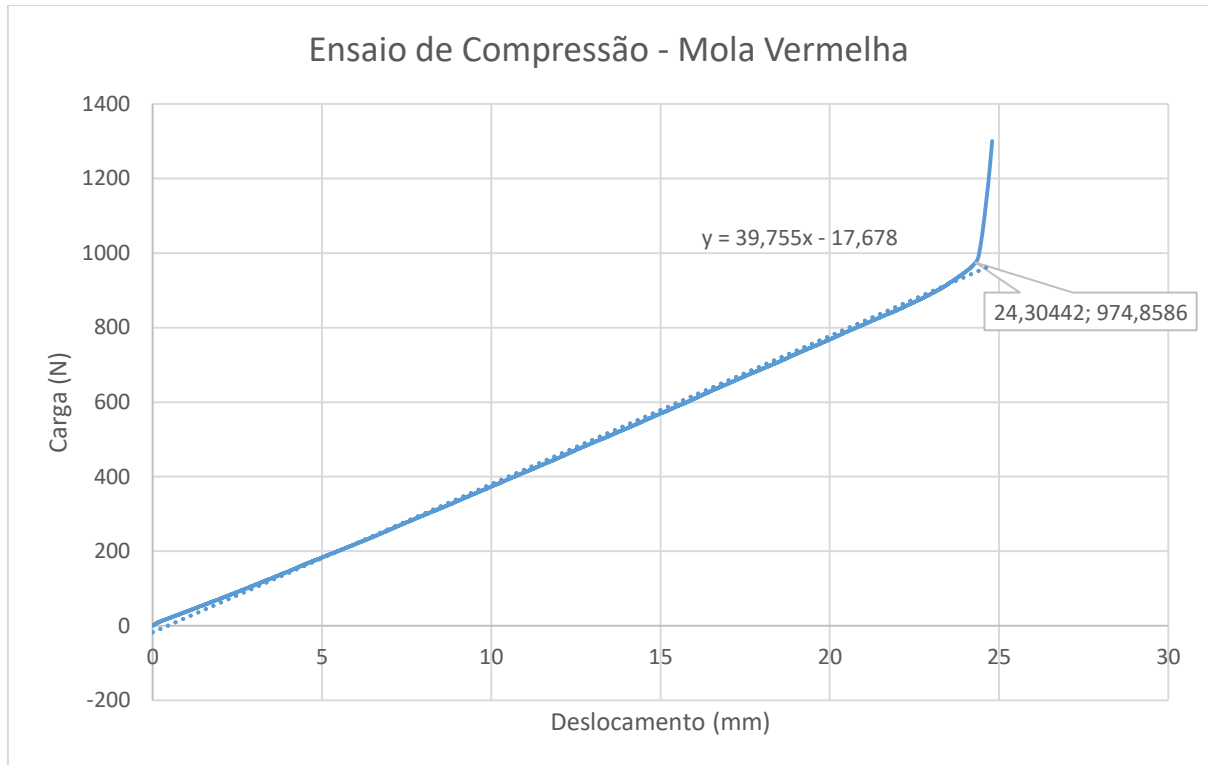
Fonte: Autor

Figura 15 - Gráfico Carga x Deslocamento do ensaio de compressão da mola amarela.



Fonte: Autor

Figura 16 - Gráfico Carga x Deslocamento do ensaio de compressão da mola vermelha.



Fonte: Autor

Dessa forma, os dados obtidos a partir dos gráficos mostrados são mostrados na tabela 5.

Tabela 5 - Dados obtidos a partir do ensaio de compressão.

	Mola Cinza	Mola Amarela	Mola Vermelha
k(N/mm)	19,233	29,578	39,755
Comprimento de Mola Livre (mm), medido	94,35	93,52	96,31
Comprimento de Mola Fechada (mm)	61,35	59,08	73,01

Fonte: Autor

Dessa forma, observa-se, como esperado, uma rigidez menor para a mola cinza, e a maior rigidez na mola vermelha. Tal fato faz com que se espere um maior desvio nos ensaios teóricos e experimentais com relação à mola cinza, pois sendo a mola de maior deformação, existem diversos fatores externos, tal como seu manuseio, que podem promover deformações

plásticas indesejadas, e imperfeições como divergência na medição dos gaps entre espiras (passo).

3.4 METALOGRAFIA

Após a realização do ensaio de compressão, passou-se então a preparar a metalografia. Esta etapa foi definida com o intuito de reunir dados que auxiliem na determinação do material, para que possam ser feitas as simulações com uma menor fonte de desvios. Optou-se por fazer após o ensaio de compressão pois as molas precisaram ser cortadas para a realização do ensaio metalográfico.

Dessa forma, passou-se a estudar a viabilidade de realizar o ensaio metalográfico com as de fotografadas. Os procedimentos são descritos nesta seção.

3.4.1 Corte e embutimento

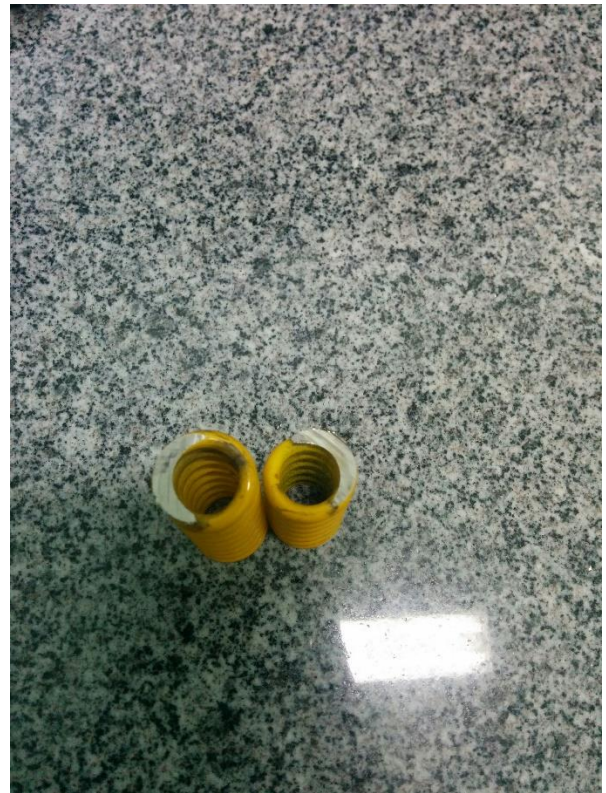
O primeiro passo, e talvez o maior desafio para o ensaio metalográfico foi cortar as molas, devido a dureza do material, e dificuldade de encontrar um equipamento que pudesse fazê-lo com a devida precisão, e sem que houvesse prejuízo na microestrutura devido ao calor.

Foi utilizada uma máquina de corte a frio, com suportes para definir uma melhor angulação, e feitas então as amostras. Os suportes e os fragmentos a serem embutidos são mostrados na figura 17.

Figura 17 – (a) Mola Cinza presa ao suporte de corte; (b) Mola amarela após seu corte; (c) Corte da mola amarela e (d) Corte da mola amarela.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autor

3.4.2 Embutimento

Com as amostras já cortadas, foi feito então seu embutimento em baquelite, utilizando uma prensa de embutimento da Arotec, modelo PRE-30Mi. O equipamento e a amostra estão na figura 18. Mais informações a respeito do equipamento podem ser encontradas na bibliografia.

Figura 18 - (a) Equipamento utilizado para o embutimento e (b) mola amarela após o embutimento.



(a)



(b)

Fonte: Autor

3.4.3 Lixamento e Polimento

Para estas etapas, utilizou-se um sistema de polimento e lixamento semiautomático da empresa Allied, do modelo MetPrep 3™ com Power Head 3. Um equipamento capaz de polir ou lixar três amostras ao mesmo tempo, graças ao mecanismo planetário que possui o equipamento, o que salvou grande tempo de preparo para este estudo.

As amostras foram então submetidas a 6 lixamentos antes de serem polidas, em ordem decrescente de rugosidade. E em seguida submetidas ao polimento, no mesmo equipamento, que é mostrado nas figura 19.

Figura 19 - (a) Politriz em funcionamento com uma das amostras



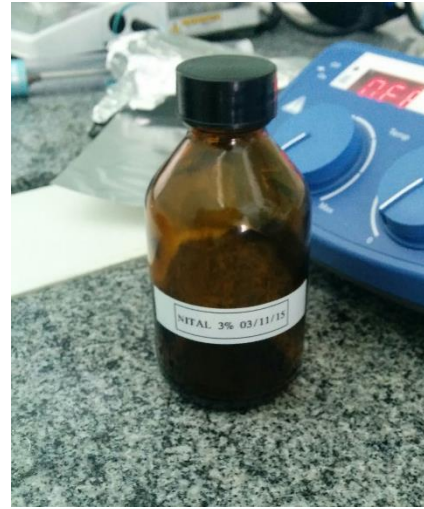
Fonte: Autor

As três amostras prontas para serem atacadas, bem como o frasco contendo o Nital utilizado no ataque são mostrados na figura 20.

Figura 20 - (a) Amostras prontas para o ataque em nital, (b) Frasco contendo Nital (3%)



(a)



(b)

Fonte: Autor

3.4.4 Microscopia

Após o ataque, as amostras estavam então prontas para serem analisadas em microscópio ótico. O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico da empresa Zeiss. As imagens obtidas são mostradas, na mesma ampliação (20x), nas figuras 21, 22 e 23.

Figura 21 - Micrografia, mola cinza.



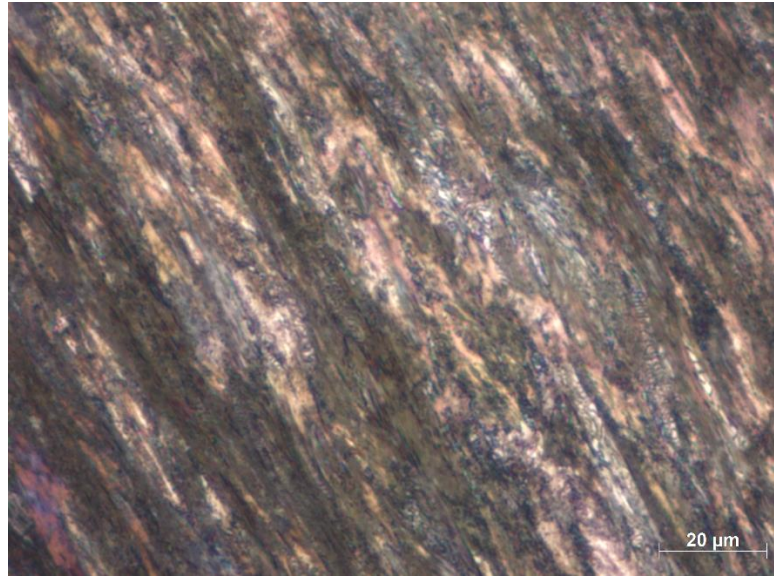
Fonte: Autor

Figura 22 - Micrografia, mola amarela.



Fonte: Autor

Figura 23 - Micrografia, mola vermelha.



Fonte: Autor

Dessa forma, através das imagens em mesma ampliação, pode-se notar grande semelhança entre suas estruturas, o que levou a assumir, a princípio, o mesmo material para as três molas.

Observamos então, na microestrutura, ferrita pró-eutectóide e perlita, com traços de concentração de manganês. Ao cruzarem-se os dados e imagens com a literatura, é possível concluir que sua microestrutura é muito semelhante aos aços AISI 1050 e 1060.

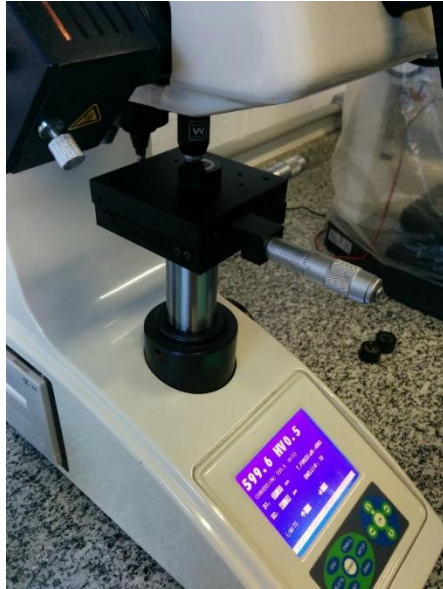
3.5 ENSAIO DE MICRODUREZA

Embora a semelhança entre as microestruturas seja suficiente para que possamos estimar um material a ser utilizado, não poderemos, com estes dados; definir com exatidão o material utilizado na fabricação dos corpos de prova. Dessa forma, por já possuir os corpos de prova preparados, e acesso ao equipamento utilizado no ensaio, optou-se por realizar um ensaio de microdureza, que fornecerá informações que auxiliarão a explicar possíveis desvios no comportamento das molas estudadas.

Utilizaram-se aqui as três amostras que passaram pela análise micrográfica, já que as superfícies são suficientemente planas para a realização do ensaio.

O equipamento utilizado e as amostras são mostrados figura 24.

Figura 24 - (a) Equipamento do ensaio de dureza e (b) amostras utilizadas.



(a)



(b)

Fonte: Autor

O equipamento foi calibrado para uma carga de 500gF por 10 segundos. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 6.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de microdureza.

	Cinza (HV)	Amarela (HV)	Vermelha (HV)
1	423,1	483,8	436,9
2	438,4	468,5	444,3
3	444,9	469,1	451,8
Média	435,5	473,8	444,3

Fonte: Autor

Nota-se aqui uma pequena variação entre as molas, porém com uma maior dureza para a mola amarela, que apresentou a maior dureza no ensaio. Para efeito de estudo, e para simplificar este trabalho, será considerado o mesmo material para as três molas devido à proximidade do valor, no entanto, é possível dizer que o comportamento esperado pela mola amarela, tanto na análise teórica, quanto nas simulações serão diferentes dos resultados experimentais.

4. ANÁLISE TEÓRICA

Uma das formas de prever o comportamento das molas em questão é através de cálculos e teoremas disponíveis na literatura. Assim, a análise teórica servirá não só como base de comparação com as demais análises, mas também como fonte de dados para a simulação, já que não foram disponibilizados recursos suficientes para reunir, de maneira experimental, todos os dados necessários para as condições de contorno.

4.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Adotaremos aqui os dados já obtidos pelas medições e pelos ensaios experimentais já realizados na seção anterior. Dessa forma, para os dados do material utilizado na fabricação das molas, serão utilizados os dados para aços carbono, mostrados na tabela 7.

Tabela 7 - Dados gerais para aços carbono.

Dados de Material	
E (GPa)	206,8
G (GPa)	80,8
ν	0,28
ρ (kg/m³)	7800

Fonte: Autor

Os dados das medições que serão aqui utilizados são mostrados na tabela 8.

Tabela 8 - Dados já definidos dos corpos de prova.

	Cinza	Amarela	Vermelha
D, mm	16,500	15,435	15,035
y_{livre}, mm	94,35	93,52	96,31
d, mm	3,55	3,46	3,87
N_a (Extremidades esquadrejadas e esmerilhadas)	15	13	15
Força Máxima, N ($y_{máx}$)	622	948	974,86

Fonte: Autor

4.2 DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE MOLA

Sabe-se, da literatura, que a resistência à tração de arames de aço bem finos é bastante elevada, já que o processo de estiramento pelo qual esses fios passam provoca o encruamento da microestrutura, aumentando muito de sua resistência, e diminuindo sua ductilidade.

Assim, realizando o passo a passo dos cálculos, que foram realizados com o auxílio do software Microsoft Excel para uma maior precisão:

- I) Para o índice das molas, temos a equação (5):

$$C = \frac{D}{d} \quad (5)$$

- II) O fator de cisalhamento direto é dado pela equação (11):

$$K_s = 1 + \frac{0,5}{C} \quad (11)$$

- III) Para a tensão de cisalhamento na espira para o maior valor de força, utiliza-se a equação (10):

$$\tau = K_s \cdot \frac{8FD}{\pi(d^3)} \quad (10)$$

- IV) Calcula-se o coeficiente de segurança de acordo com a equação (15):

$$N_s = \frac{S_{ys}}{\tau} \quad (15)$$

V) Para o coeficiente de cada mola, pela equação (7):

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \quad (7)$$

VI) Para o deslocamento, tem-se a equação (16):

$$y = \frac{F}{k} \quad (16)$$

VII) Para a resistência à tração do material, tem-se, pela equação (4), utilizando-se os valores da tabela 1:

$$S_{ut} = A \times d^b \quad (4)$$

VIII) Por fim, considerando, para a resistência ao escoamento, pela equação (17):

$$S_{ys} = 0,6 \times S_{ut}$$

Os resultados obtidos são mostrados na tabela 9.

Tabela 9 - Resultados obtidos.

	Cinza	Amarela	Vermelha
C	4,648	4,461	3,885
K_s	1,108	1,112	1,129
τ, MPa	646	1000,4	726,8
N_s	1,4	0,9	1,2
k, N/mm	23,81	30,28	44,44
y, mm	26,1	31,3	21,9
S_{ut}, MPa	1391,9	1398,4	1370,2
S_{ys}, MPa	835,1	839,1	822,1

Fonte: Autor

Já é notado que há possível falha por escoamento na mola amarela para a condição de carga máxima, que foi aplicada no ensaio de compressão, além da já citada diferença na dureza do material utilizado na mola amarela, há também a hipótese de ter ocorrido falha na medição do fio da mola. A incerteza das medições ficará, tendo em vista que foram realizados ensaios destrutivos nas molas após suas medições. Nota-se também um grande desvio entre os resultados teóricos e experimentais mostrados pela mola cinza, porém a comparação entre os resultados das diferentes análises é deixado para uma seção posterior.

5. ANÁLISE COMPUTACIONAL

O foco das simulações dos corpos de prova foi estabelecer uma análise simplificada do ensaio de compressão em ambiente virtual. Para tal, foram projetadas as molas no software SolidWorks e em seguida foi adaptado o ensaio para a simulação utilizando o software ANSYS Mechanical Workbench.

5.1 DESENHO DAS MOLAS

É importante ressaltar aqui que já surge nessa etapa a primeira possível fonte de desvios para os resultados das simulações, uma vez que as medidas foram tomadas manualmente, e suas médias foram os valores adotados.

As medidas chave para o projeto da hélice no software SolidWorks foram o passo, que varia, e portanto uma média certamente fará com que o comprimento total da mola desenhada seja maior ou menor do que o da mola real, e os diâmetros do fio da mola e das espiras (interno e externo).

5.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

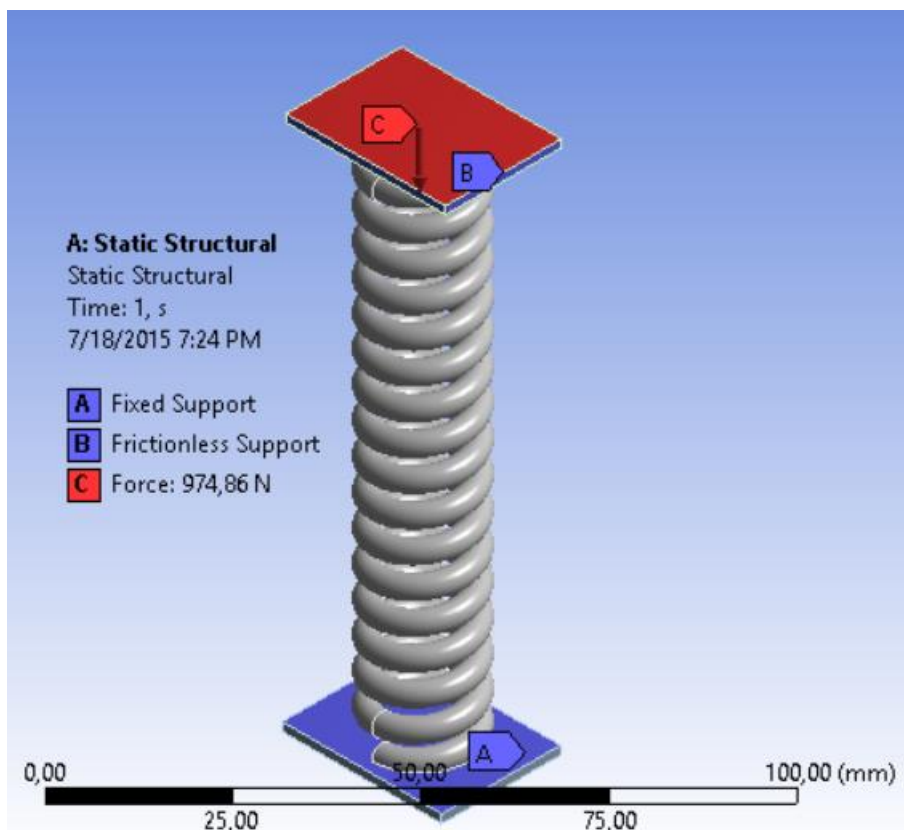
Nesta seção serão descritas as condições de contorno adotadas no software ANSYS Mechanical Workbench a partir da exportação dos projetos das três molas em CAD.

5.2.1 Aplicação da carga

O primeiro problema a ser discutido é a maneira como serão aplicadas as cargas na simulação. Nesse quesito, adotou-se duas placas, uma em cada extremidade das molas, onde uma é fixada e a força de compressão é aplicada na extremidade oposta.

Com isso, na extremidade arbitrariamente escolhida inferior, serão aplicadas as condições de contorno de um suporte fixo. Em contrapartida, na extremidade oposta, será aplicada a carga no sentido da base oposta, e as condições de contorno serão de suportes simples (roletes) nas quatro extremidades paralelas ao eixo da mola, de modo a garantir que a carga aplicada seja axial. O resultado é mostrado na figura 25.

Figura 25 – Mola Vermelha já submetida às condições de contorno e à carga final do ensaio de compressão (974,86N).



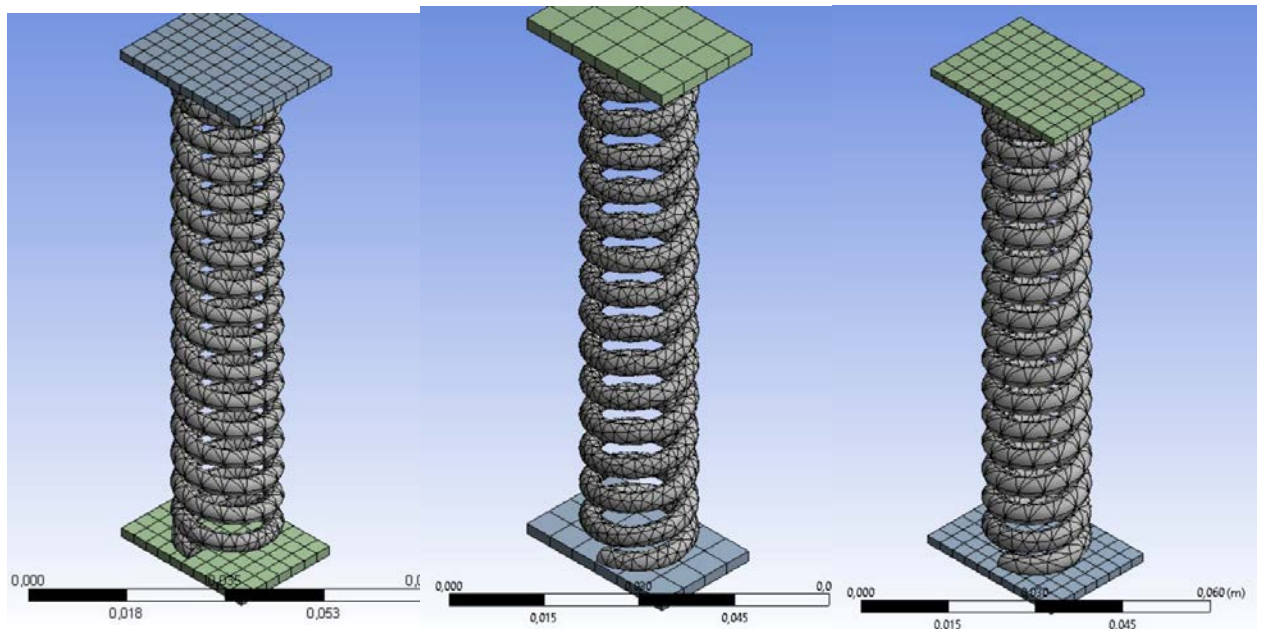
Fonte: Autor

Vale ressaltar que os suportes foram adicionados com a função “add frozen”, que faz com que o arranjo funcione como uma montagem.

5.2.2 Malha

A malha utilizada será a automática gerada pelo ANSYS. O motivo para tal, foi que ao esboçar-se um teste de convergência, obteve-se uma variação mínima de resultados com grandes variações na quantidade de elementos gerados, dessa forma, chega-se à conclusão de que as malhas geradas automaticamente para as três molas estão próximas de suas configurações ótimas, levando a um menor esforço computacional. As malhas geradas são mostradas na figura 26.

Figura 26 - (a) Malha da mola cinza, (b) malha da mola amarela e (c) malha da mola vermelha.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autor

Para os números de nós, e elementos de cada uma das malhas, tem-se:

- Mola cinza: 12371 nós, 5173 elementos
- Mola amarela: 16246 nós, 7517 elementos
- Mola vermelha: 10389 nós, 4235 elementos

5.2.3 Análise e resultados

O material utilizado aqui será o aço definido após os ensaios metalográficos e de dureza. As resistências a tração e ao escoamento do material foram retirados da análise teórica. Os valores são dados pela tabela 10:

Tabela 10 - Valores das resistências a tensão e escoamento, obtidos anteriormente.

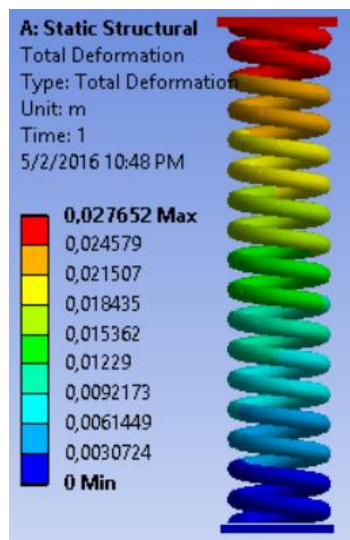
	Cinza	Amarela	Vermelha
Sut, MPa	1391,9	1398,4	1370,2
Sys, MPa	835,1	839,1	822,1

Fonte: Autor

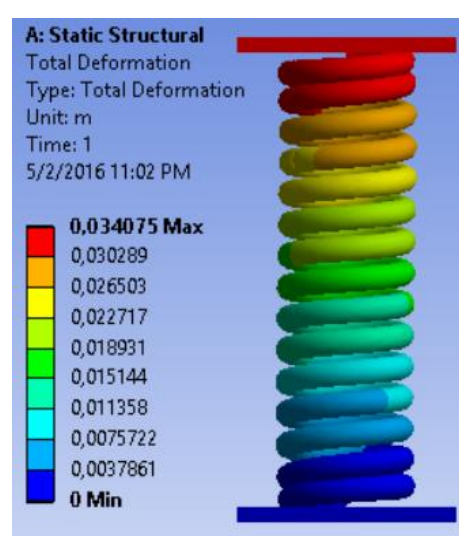
Como as molas apresentarão comportamento linear, optou-se por mostrar aqui os pontos de deflexão máxima obtidos no ensaio de compressão. O objetivo aqui é obter as deformações das molas para as respectivas cargas máximas, e comparar os valores com os resultados teórico e experimental.

Assim, para as cargas máximas aplicadas temos os resultados mostrados na figura 27.

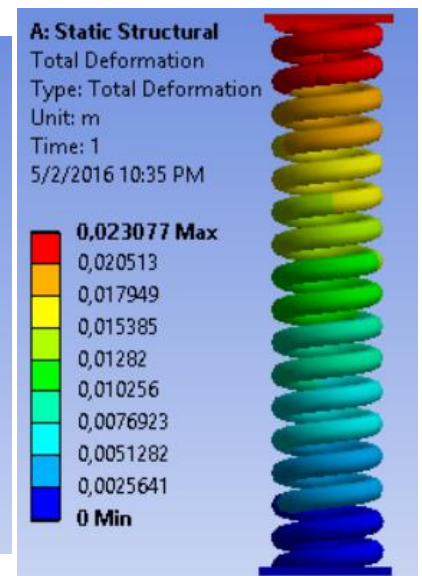
Figura 27 – Deformação em modelo computacional: (a) Mola cinza, (b) Mola amarela e (c) Mola vermelha.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor

Dessa forma, os resultados obtidos através da análise computacional são mostrados na tabela 11.

Tabela 11 - Resultados da análise computacional.

	Cinza	Amarela	Vermelha
y_{livre}, mm	105,55	96,35	97,42
F, N (carga aplicada)	622	948	974,86
y, mm (Deformação)	27,652	34,075	23,077
k, N/mm	22,49	27,82	42,24

Fonte: Autor

Esses valores serão utilizados para base de comparação, e já é importante citar que o comprimento de mola livre resultante da geometria no software consta na tabela para mostrar uma das possíveis fontes de desvio entre o resultado experimental, e o da análise computacional.

6. DISCUSSÃO

Com os ensaios e resultados teóricos já obtidos, esta seção trata de compará-los, com a finalidade de entender quais os efeitos que algumas propriedades chave têm no comportamento mecânico dos corpos de prova.

6.1 COEFICIENTES DE MOLA: EXPERIMENTAL, TEÓRICO E COMPUTACIONAL

Como mostrado nas seções anteriores, foram obtidos os valores para a constante de mola de cada um dos corpos de prova, de três formas diferentes. Comparando os valores então, teremos os resultados mostrados na tabela 12.

Tabela 12 - Tabela de comparação das constantes de mola em N/mm

<i>Constante das molas em N/mm e desvio em relação ao experimental</i>	Teórico	Computacional (Simulação)	Experimental
Cinza	23,81 (18,6%)	22,49 (17%)	19,23
Amarela	30,28 (2,4%)	27,82 (5,9%)	29,58
Vermelha	44,44 (11,8%)	42,24 (6,2%)	39,76

Fonte: Autor

Nota-se então uma mesma tendência entre as três análises, onde a mola mais rígida é a mola vermelha, seguida pelas molas amarela e cinza. Resultado já esperado pelo simples manuseio dos corpos de prova antes das análises.

Observou-se também pouco desvio entre os valores de k em todas as situações quando feita comparação com o valor obtido no ensaio experimental. É importante ressaltar que duas fontes de erro podem influenciar nesses poucos pontos porcentuais de desvio.

- A aproximação do material da mola, que atua nas condições de contorno das análises teórica e computacional;

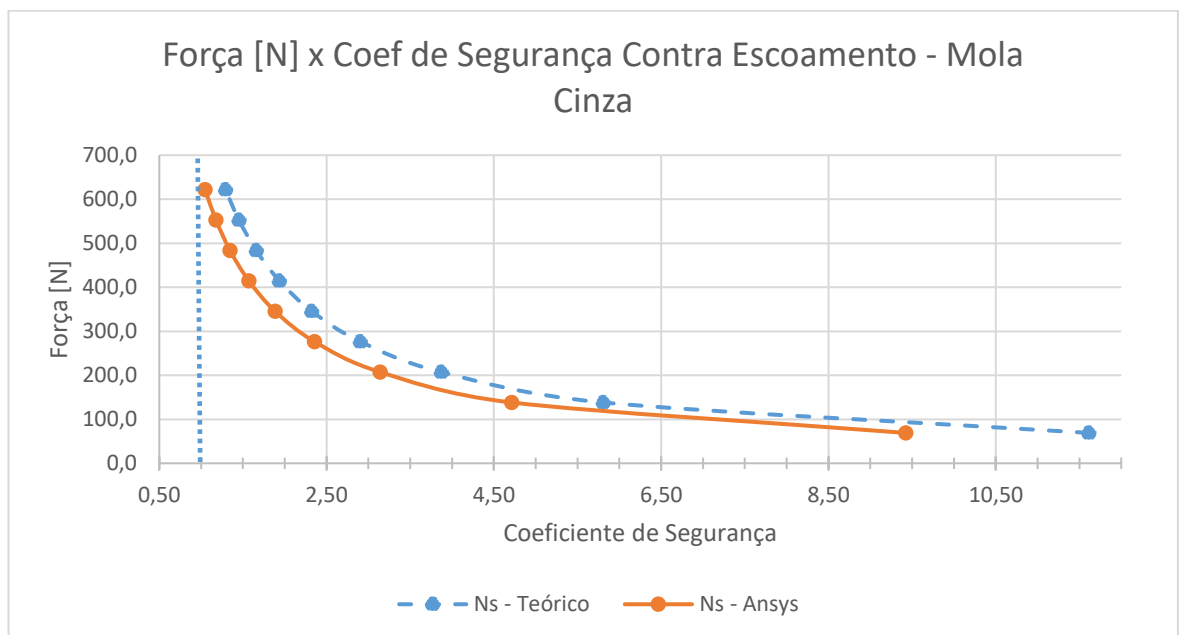
- Falhas nas medições, bem como irregularidades nas medidas das molas, como um passo não constante podem ter influência na modelagem em ambiente computacional, e dificultam a previsão da deformação das molas em estudo;
- Dessa forma, pode-se justificar um maior desvio entre os resultados na mola cinza, e um menor desvio na mola amarela, já que foi a mola com a qual a geometria resultante em ambiente computacional mais se assemelhou.

A comparação entre valores de k faz com que não seja necessária a comparação entre as deformações, já que o valor da constante de mola deriva diretamente da deformação, e as forças aplicadas são as mesmas em todas as situações.

6.2 COEFICIENTE DE SEGURANÇA CONTRA ESCOAMENTO – SIMULAÇÃO x ANÁLISE TEÓRICA

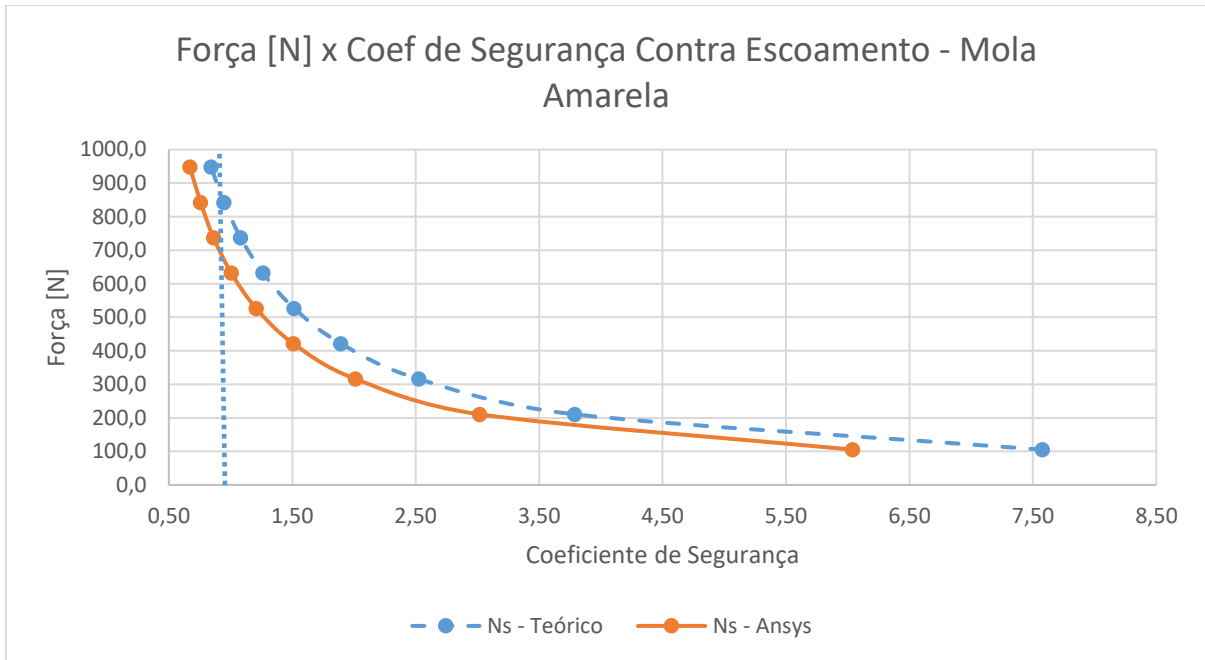
A condição crítica para molas helicoidais de compressão é a falha por escoamento devido a tensão cisalhante. Assim, cada mola deve ter uma carga máxima passível de ser aplicada antes que a falha ocorra, dessa forma, foi feita a análise variando a carga para as análises teórica e para a simulação, com a intenção de observar as semelhanças e as diferenças entre as curvas.

Figura 28 – Gráfico dos coeficientes de segurança contra escoamento, mola cinza.



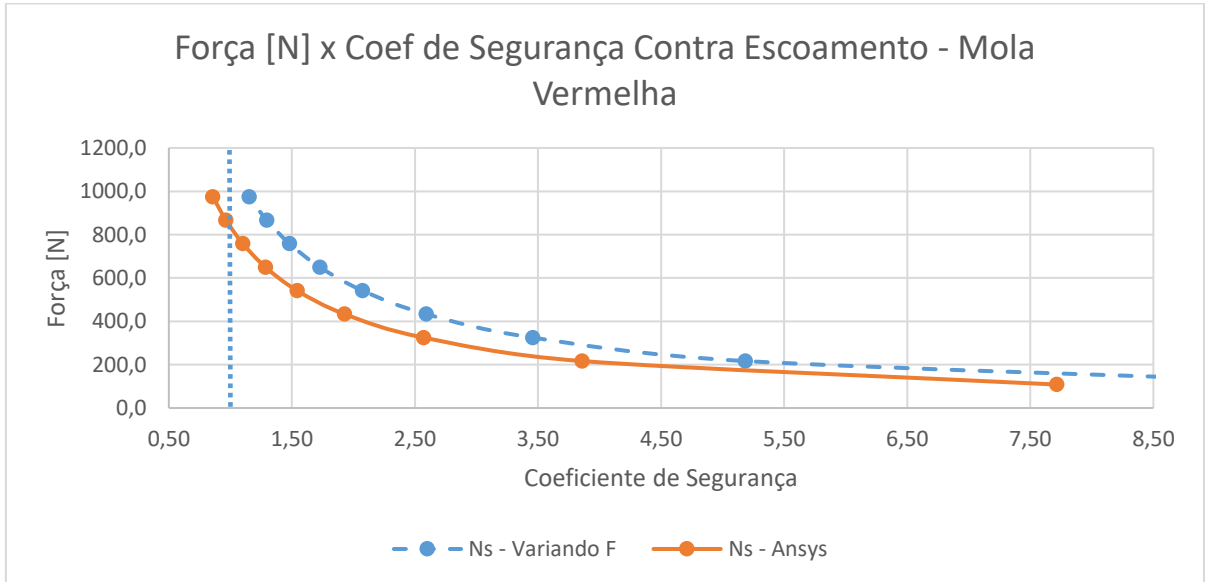
Fonte: Autor

Figura 29 – Gráfico dos coeficientes de segurança contra escoamento, mola amarela.



Fonte: Autor

Figura 30 – Gráfico dos coeficiente de segurança contra escoamento, mola vermelha.



Fonte: Autor

Dessa forma, pode-se notar que as curvas de ambas as análises, em todas as situações possuem um formato muito semelhante, onde a carga tem uma maior influência no valor do coeficiente de segurança nos valores mais baixos, enquanto que é necessária uma variação maior na carga para a alteração do valor de N_s em valores próximos a 1.

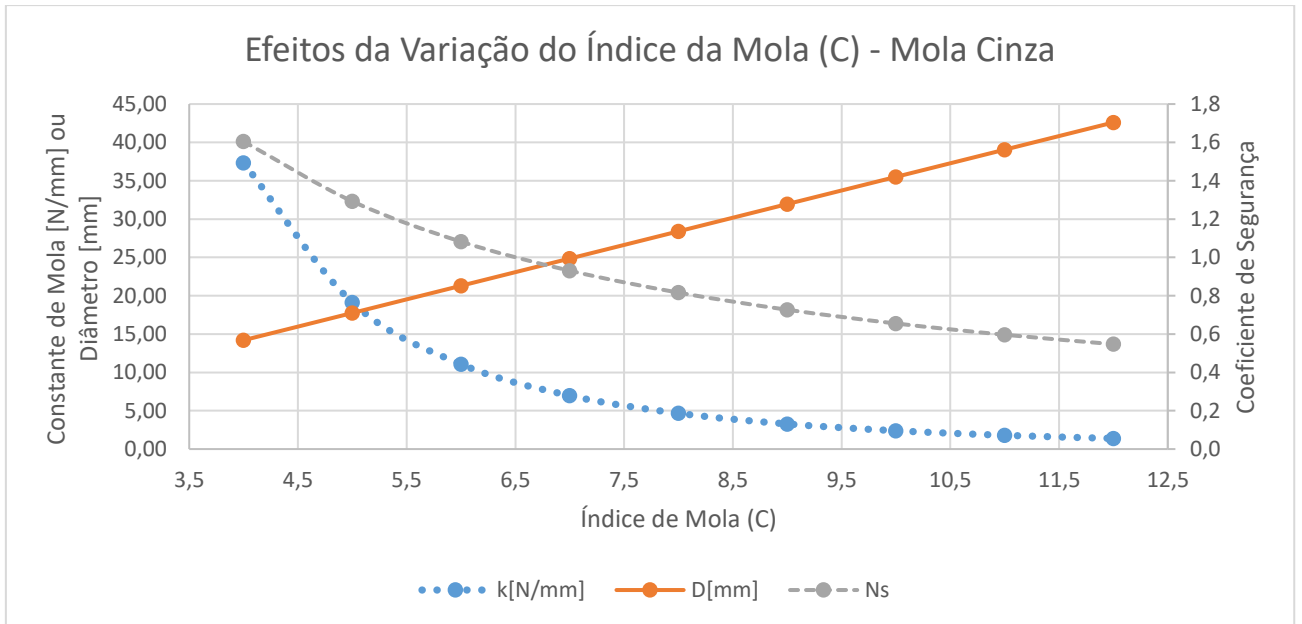
Quanto aos valores, percebe-se que para a mola amarela, como já esperávamos uma previsão de falha nas duas análises para a carga aplicada, no entanto, atribui-se isso ao fato de que a dureza do material da mola amarela é sensivelmente maior que a das demais molas, e as previsões utilizaram um mesmo material para os três casos. Dessa forma, justifica-se também o alto valor da carga máxima aplicada na mola amarela, já que esperava-se, em princípio um valor mais distante do valor encontrado para a mola vermelha.

Ainda é possível também reparar um desvio entre as curvas, com uma variação porcentual constante, em torno de 20% para os três casos. Vale também ressaltar que deve-se desconsiderar os valores dos gráficos das figuras 29 e 30 onde o coeficiente de segurança é menor do que um. Isso se deve ao fato de que o regime não é elástico nestes pontos.

6.3 EFEITOS DA VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE MOLA

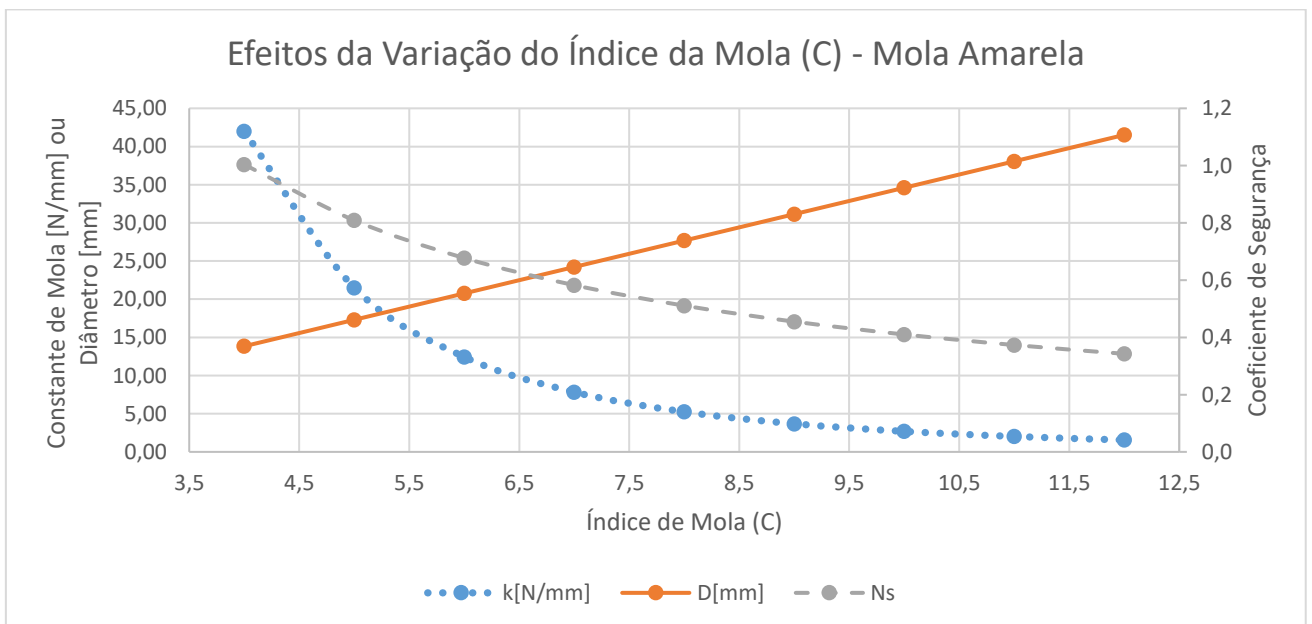
O índice de mola é a propriedade que traduz de forma simples a influência que a geometria tem sobre o comportamento da mola, dessa forma, a variação dessa propriedade é de interesse para este estudo. Assim, foram confeccionados três gráficos para cada uma das molas de estudo, com C variando entre 4,0 e 12,0 e mostrado nas figuras 31, 32 e 33.

Figura 31 - Gráfico dos efeitos da variação do índice de mola, mola cinza.



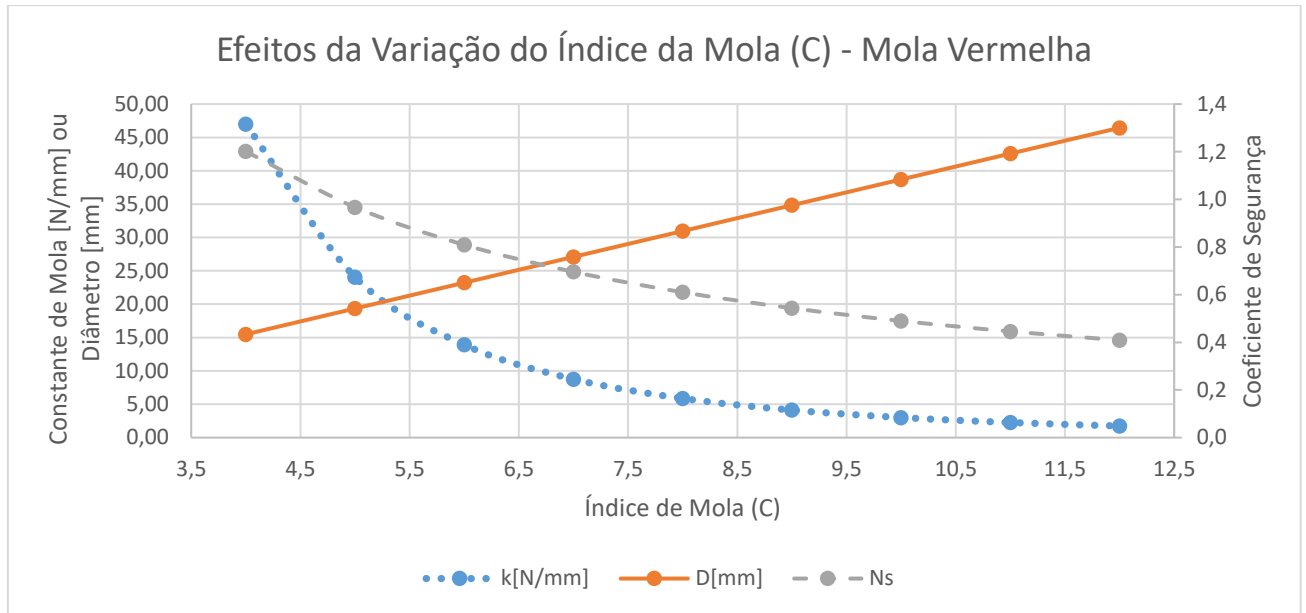
Fonte: Autor

Figura 32 - Gráfico dos efeitos da variação do índice de mola, mola amarela.



Fonte: Autor

Figura 33 - Gráfico dos efeitos da variação do índice de mola, mola vermelha.



Fonte: Autor

Dessa forma, pelos gráficos apresentados, algumas observações podem ser feitas. Nota-se para as variações do coeficiente de segurança e da constante de mola que o índice de mola tem uma influência maior nos valores mais baixos, entre 4 e 7, e o valor tende a se estabilizar em seguida. Para o coeficiente de segurança, nota-se que a falha por escoamento é menos provável em valores menores de C, assim, como esperado valores maiores de C resistem a uma carga menor.

7. CONCLUSÃO

Com relação ao estudo do comportamento mecânico de molas helicoidais de compressão, podem ser apresentadas as seguintes conclusões:

- i. O material dos corpos de prova é o fator que mais gerou desvios segundo a análise, tendo em vista o número de aproximações que precisaram ser feitas para a definição de um material de estudo;
- ii. As técnicas de microscopia se mostraram essenciais para o estudo, já que sem elas não haveriam dados suficientes para as condições de contorno. Dependendo do nível de precisão necessária, outros ensaios devem ser feitos para que as propriedades do material causem menos desvio nas análises teórica e computacional;
- iii. O fato de o ensaio de compressão ter sido realizado antes das medições foi fonte de desvios, principalmente nos resultados da análise computacional, já que as medições influenciaram diretamente no modelo computacional realizado;

Dessa forma, conclui-se que o estudo cumpriu o que foi proposto, e trouxe métodos de comparação e análise que poderão ser utilizados em trabalhos futuros, além de resultados próximos entre os tipos de análise, com fontes de desvio bem identificadas, e que poderão ser minimizadas com o devido rigor.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a conclusão do presente estudo, pudemos verificar diversos aspectos importantes para o estudo de molas helicoidais de compressão, dessa forma, as observações mais importantes mostradas ao longo do trabalho podem gerar margem a novos estudos e melhorias a este tema que ainda tem muito a ser explorado.

- A definição do material tem o papel crucial no estudo, já que com uma aproximação razoável existem desvios. Assim, creio que seja interessante estudar mais a fundo as causas dos desvios, e formas de minimizá-los através de análise teórica;
- O comportamento das molas em fadiga é um passo óbvio para prosseguimento do presente estudo, dessa forma, sugiro validar o estudo através de ensaios já realizados, caso não haja a possibilidade de realizar um ensaio próprio, e empregar a mesma metodologia aos corpos de prova. Um ensaio de fadiga requer recursos de difícil acesso, se comparado ao ensaio de compressão, utilizado para validar este trabalho.
- A análise computacional foi bastante simplificada, desde a geometria até as condições de contorno, no entanto, antes de uma análise detalhada, e sem tantas simplificações, não se podem tirar conclusões claras a respeito da influência dessas aproximações nos desvios encontrados. Assim, sugiro um maior grau de detalhe em um próximo estudo, de modo a analisar o quanto cada uma dessas simplificações pode influenciar o que resultado, e formas de melhorar o estudo citado.

REFERÊNCIAS

ARCANJO, E. P. **Caracterização do comportamento à fadiga de molas**. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

AROTEC INDÚSTRIA E COMÉRCIO. **Prensa de embutimento PRE-30Mi/PRE-40Mi: especificações técnicas**. Apresenta as especificações técnicas da prensa de embutimento. 2016. Disponível em: < <http://www.arotec.com.br/mnu-lado-metalografia/mnu-lado-preparamostras/mnu-lado-embutidoras/mnu-lado-pre30-40mi#resumo>>. Acesso em: 01 set. 2016.

ASSOCIATED SPRING. **Design handbook: engineering guide to spring design**. Associated Bristol: Spring, Barnes Group Inc., 1987.

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

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 637 p.

MITUTOYO SUL AMERICANA LTDA. **Catálogo de paquímetros analógicos**. Apresenta as especificações técnicas do paquímetro utilizado. 2016. Disponível em: < <http://www.mitutoyo.com.br/novosite/produtos/produtos/01small/paquimetroanalogico.html> >. Acesso em: 01 set. 2016.

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

SHIMADZU DO BRASIL. **AG-X: especificações técnicas**. Apresenta as especificações técnicas do equipamento de ensaio de compressão. 2016. Disponível em: < http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/test/estaticas/servo-eletricas/ag-x-espec_tecn.shtml>. Acesso em: 01 set. 2016.