

HEITOR AUGUSTO DE ALCANTARA PABON

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA MOLA HELICOIDAL DE
COMPRESSÃO SUBMETIDA A CARREGAMENTOS ESTÁTICOS**

Guaratinguetá
2017

HEITOR AUGUSTO DE ALCANTARA PABON

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA MOLA HELICOIDAL DE
COMPRESSÃO SUBMETIDA A CARREGAMENTOS ESTÁTICOS

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
2017

P113e

Pabon, Heitor Augusto de Alcântara

Estudo do comportamento mecânico de uma mola helicoidal de compressão submetida a carregamentos estáticos / Heitor Augusto de Alcântara Pabon – Guaratinguetá, 2017.

48f : il.

Bibliografia: f. 47-48

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. Peças de máquinas. 3. Máquinas - Projetos

I. Título

CDU 621.7

HEITOR AUGUSTO DE ALCANTARA PABON

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

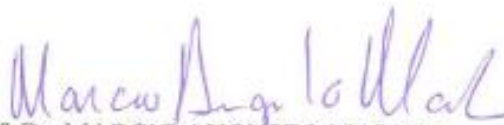
BANCA EXAMINADORA:



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



Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI
UNESP-FEG



Prof. Dr. MARCIO AUGUSTO MARTIN
UNESP-FEG

Julho de 2017

DADOS CURRICULARES

HEITOR AUGUSTO DE ALCANTARA PABON

NASCIMENTO 20.10.1991 – SÃO BERNARDO DO CAMPO / SP

FILIAÇÃO Rafael Pedro Pabon Albert
Maria Lucelia Mello de Alcantara

2010/2017 Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

de modo especial, aos meus pais, que com muito amor e dedicação me apoiaram e incentivaram ao longo da minha vida, contribuindo grandemente em todas as conquistas que obtive, especialmente no presente trabalho.

AGRADECIMENTOS

Sempre em primeiro lugar agradeço a Deus, criador dos céus e da terra, pela salvação, graça, misericórdia e amor com que tem me tratado por todos os dias de minha vida. Sem Ele eu nada seria, nada teria e definitivamente não estaria aqui.

aos meus pais, *Rafael e Lucelia*, meus maiores apoiadores, que em tudo torceram por mim e me incentivaram, não só na Universidade mas em toda minha vida; Que me ensinaram a buscar em Deus, a ter caráter, respeito, e força de vontade, independente da circunstância. A eles, meu eterno amor e gratidão.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva* que jamais deixou de me auxiliar. Sem sua dedicação, auxílio, orientações e conselhos, a realização deste trabalho não seria possível.

ao *Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi*, cujos conselhos me serviram de guia quando eu mais precisava.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pelo auxílio, educação e dedicação, me auxiliando não só nesta fase do curso mas em todos meus anos de faculdade.

à *Confab Industrial S.A.*, em particular aos Técnicos do departamento da Qualidade, nas pessoas de *Leandro de Paula, Benedito Cavalheiro, Dinara Bastos, Oswaldo Hoshi, Maurílio Santos* e especialmente ao Jonas Macedo, que em meio às diversas atividades na empresa, arrumaram tempo e com dedicação, paciência e de uma maneira muito didática me orientaram e auxiliaram na obtenção dos resultados, a vocês dedico este trabalho.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

RESUMO

Através de uma abordagem prática, este trabalho tem como objetivo realizar a análise estática de uma mola helicoidal de compressão. Com isso em mente, inicialmente foi realizado um estudo teórico dos conceitos a serem empregados no presente trabalho, partindo-se logo em seguida para a parte experimental do mesmo. Além dos ensaios mecânicos de compressão e de dureza Vickers de baixa força, que forneceram algumas propriedades da mola, como a constante elástica da mesma, a dureza do material que compõe o elemento, bem como a resistência a tração do mesmo, foi também realizado o ensaio químico de espectrometria, a fim de definir qual o material estudado. Com tais resultados aferidos, calcularam-se as mesmas propriedades usando do referencial teórico disponível, de modo a comparar os resultados teóricos e experimentais, validando assim os métodos utilizados. Através do presente trabalho, com seus procedimentos executados conforme as normas regulamentadoras cabíveis, foi possível se observar a ampla gama de aplicações disponíveis, bem como se compreender a importância das mesmas dentro de diversos setores da indústria e da sociedade.

PALAVRAS-CHAVE: Molas Helicoidais. Projeto de Molas. Elementos de Máquina. Ensaio Mecânicos.

ABSTRACT

Through a practical approach, this work aims to perform the static analysis of a helical compression spring. With this in mind, a theoretical study of the concepts to be used in the present work was initially carried out, beginning afterwards with the experimental part of it. In addition to the mechanical tests of compression and low force hardness Vickers, which provided some properties of the spring, as its elastic constant, the hardness of the material that composes the spring, as well as the tensile strength of it, was also realized the Spectrometric assay in order to define which material was studied. With such results, the same properties were calculated using the available theoretical references, in order to compare the theoretical and experimental results, thus validating the used methods. Through the present work, with its procedures performed in accordance with applicable regulatory standards, it was possible to observe the wide range of applications available, as well as to understand the importance of the same within various areas of industry and society.

KEYWORDS: Helical Springs. Springs Project. Machine Elements. Mechanical tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Extremidade de molas helicoidais de compressão.....	15
Figura 2 - Autograph AG-X em operação.....	16
Figura 3- Célula de carga de 50 kN da AG-X.....	16
Figura 4 - Autograph AG-X de 50 kN da fabricante Shimadzu.....	17
Figura 5 - Penetrador piramidal de base quadrada.....	18
Figura 6 - Durômetro utilizado no ensaio de dureza Vickers de baixa força.....	18
Figura 7 - Espectrômetro de emissão atômica.....	19
Figura 8 - Amortecedor traseiro de bicicleta WG Sports.....	21
Figura 9 - Amortecedor desmontado.....	21
Figura 10- Dimensões de uma mola helicoidal de compressão.....	22
Figura 11 - Esboço 2D das bases da mola.....	24
Figura 12 - Bases usinadas utilizadas no ensaio de compressão.....	24
Figura 13 - Comparativo do tamanho das bases com relação à mola.....	25
Figura 14 – Autograph AG-X após encaixe das bases e fixação da mola.....	26
Figura 15 - Tela do software Trapezium X para configuração do ensaio de compressão.....	26
Figura 16 - Penetrador piramidal de base quadrada utilizado no ensaio.....	27
Figura 17 - Embutidor Mecapress 3.....	28
Figura 18 - Mesa de lixamento para preparação da amostra a ser ensaiada.....	30
Figura 19 - Pasta de diamante de 3 μ para polimento da amostra a ser ensaiada.....	30
Figura 20 - Amostra da sessão longitudinal do arame da mola helicoidal de compressão.....	31
Figura 21 - Amostra da sessão transversal do arame da mola helicoidal de compressão.....	31
Figura 22 - Amostra utilizada no ensaio de espectrometria.....	34
Figura 23 - Suporte da amostra utilizada no ensaio de espectrometria.....	34
Figura 24 - Diagrama força x deslocamento da mola.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medições da mola helicoidal de compressão.	22
Tabela 2 - Parâmetros de embutimento a quente.....	29
Tabela 3 - Diretrizes para caracterização dimensional de molas de compressão.	37
Tabela 4 - Resultado do ensaio de dureza Vickers na seção transversal da mola.	39
Tabela 5 - Resultado do ensaio de dureza Vickers na seção longitudinal da mola.	39
Tabela 6 - Dureza Brinell e Sut para o corte transversal da mola de compressão.	40
Tabela 7 - Dureza Brinell e Sut para o corte longitudinal da mola de compressão.....	41
Tabela 8 - Coeficientes e expoentes para o cálculo do <i>Sut</i>	41
Tabela 9 – Composição química da mola de compressão em porcentagem de massa.	43
Tabela 10 - Tabela de aços da fabricante Sandsteel(2013).	44
Tabela 11 - Tabela de conversão Brinell para Rockwell C.	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.3	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	13
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	MOLAS.....	15
2.1.1	Molas helicoidais de compressão	15
2.2	ENSAIOS MECÂNICOS	16
2.2.1	Ensaio de compressão	16
2.2.2	Ensaio de dureza Vickers de baixa força	17
2.2.3	Ensaio de espectrometria por emissão atômica.....	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	DEFINIÇÃO DA PROPOSTA E CONSIDERAÇÕES	20
3.2	INFRAESTRUTURA DE PROCESSAMENTO	20
3.3	DADOS DA MOLA	20
3.3.1	Medições.....	22
3.4	ENSAIOS MECÂNICOS E QUÍMICO	23
3.4.1	Ensaio de compressão	23
3.4.2	Ensaio de dureza Vickers de baixa força	27
3.4.3	Ensaio de espectrometria por emissão atômica.....	32
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	36
4.1	ENSAIO DE COMPRESSÃO	36
4.1.1	Resultados experimentais	36
4.1.2	Resultados calculados	36
4.1.3	Comparação.....	37
4.2	ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	38
4.2.1	Resultados experimentais	38
4.2.2	Resultados calculados	41
4.2.3	Comparação.....	42
4.3	ENSAIO DE ESPECTROMETRIA POR EMISSÃO ATÔMICA	43
4.3.1	Resultados experimentais	43
4.3.2	Comparação.....	44
5	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Segundo Arcanjo (2008), pode-se definir mola com sendo um único elemento ou uma associação de elementos capaz de assumir notáveis deformações elásticas quando submetida a forças ou momentos, em condições de armazenar energia potencial elástica. Suas aplicações acontecem principalmente nos casos de:

- a) Armazenamento de energia, como é o caso do arco e flecha e molas do mecanismos de relógio;
- b) Preservação de junções ou contatos, como em sistemas de exaustão de motores de combustão interna ou vasos sob pressão;
- c) Amortecimento de choque, como em amortecedores automotivos e de edificações, como pontes e prédios;
- d) Distribuição de carga, como em colchões;

Uma mola é geralmente considerada, para efeitos de cálculo, sem massa nem amortecimento. Esta é considerada linear elástica quando a sua deformação é diretamente proporcional à força que a provocou, ou seja, obedece à lei de Hooke (equação 1):

$$F = k \delta \quad (\text{Eq. 1})$$

sendo k a rigidez ou constante elástica da mola, F a força aplicada na mola e δ a variação de comprimento entre as extremidades sofrida pela mola (Arcanjo, 2008).

Quando está isolada, uma mola permanece em equilíbrio e não possui energia potencial armazenada. Se pressionada ou esticada, a mola reage com uma força contrária à que nela atua. A força que atua na mola altera alguma propriedade física dela (em geral, essa propriedade é o comprimento). Enquanto permanece comprimida ou esticada, a mola possui energia potencial (no caso, potencial elástica) armazenada. Se a força deixa de atuar, a mola libera energia potencial rapidamente, tendendo a voltar ao equilíbrio (FILHO, 2011).

Existem diversos tipos de mola, sendo as mais comuns as do tipo helicoidal. A necessidade desta diversidade de molas se deve ao fato de existirem diversas aplicações com necessidades particulares, como em veículos ferroviários, nos suportes de máquinas – ferramenta e numa infinidade de outras aplicações.

As molas do tipo helicoidal são aplicadas em diversas situações, sendo o modelo mais comum entre os tipos encontrados no mercado. Formadas por um fio enrolado em forma de

espiral, possuem a flexibilidade ideal para serem esticadas e voltarem ao seu estado de equilíbrio, realizando movimentos como o amortecimento de automóveis, entre outros.

1.2 OBJETIVOS

O intuito deste trabalho é realizar a análise estática da mola selecionada, de uma maneira didática, através da realização de ensaios mecânicos além de validar os resultados obtidos pela comparação entre os resultados experimentais com os obtidos através das formulações disponíveis na literatura.

Além disso, também se tem por objetivo demonstrar a importância dos ensaios mecânicos e do conhecimento de elementos de máquina, e como o conhecimento aprofundado destes são um excelente complemento à formação acadêmica (durante o decorrer do curso, os conhecimentos adquiridos nas disciplinas são muito superficiais e teóricos), além de serem úteis tanto nas áreas de pesquisa quanto na indústria.

1.3 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A maior motivação para realização deste trabalho foi a vontade realizar um trabalho técnico, que me possibilitasse ver na prática uma parte dos conhecimentos teóricos obtidos ao longo do curso, aprimorando assim minha estrutura curricular e meus conhecimentos específicos; assim, me foi proposto por meu professor orientador a realização do presente trabalho, que abordaria temas abordados nas disciplinas de “Elementos de Máquina” e “Propriedades mecânicas dos Materiais”.

Neste contexto, o autor deste trabalho ficou responsável por fazer a análise estática da mola, iniciando com as medições, passando para o ensaio de compressão, corte da mola, embutimento, ensaio de dureza e por fim a espectrometria, comparando então os resultados experimentais com os que seriam obtidos através dos cálculos (com as fórmulas presentes na literatura).

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Este trabalho é composto por cinco capítulos. A presente seção faz parte do capítulo 1, em que basicamente o tema do trabalho é apresentado de uma maneira geral, com a introdução, objetivos e motivações.

O capítulo 2 aborda basicamente a fundamentação teórica. Nele basicamente tem-se a apresentação da teoria do objeto de estudo, bem como a introdução à teoria de ensaios mecânico e químico, que serão amplamente utilizados no presente trabalho.

O capítulo 3 aborda os materiais e métodos empregados para a obtenção dos resultados. O objeto de estudo é apresentado, com suas dimensões, e os ensaios realizados são descritos, a fim de se abrir caminho para a discussão dos resultados no capítulo 4.

O capítulo 4 é composto pela exposição dos resultados obtidos experimentalmente e com base na teoria, sendo posteriormente comparados e discutidos.

Finalmente, no capítulo 5 é são feitas as considerações finais e expostas as conclusões obtidas com o presente estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MOLAS

Segundo Arcanjo (2008), pode-se definir mola como sendo um único elemento ou uma associação de elementos capaz de assumir notáveis deformações elásticas quando submetida a forças ou momentos, em condição de armazenar energia potencial elástica.

Molas podem ser encontradas em diversas formas, tamanhos e aplicações, sendo definidas de acordo com seu formato e força à qual é submetida. As mais comumente encontradas em aplicações mecânicas são as helicoidais, que apresentam seção transversal circular. A necessidade desta grande diversidade de molas se deve ao fato de existirem aplicações com condições particulares, como espaço útil para utilização da mola e de especificações próprias dos projetos.

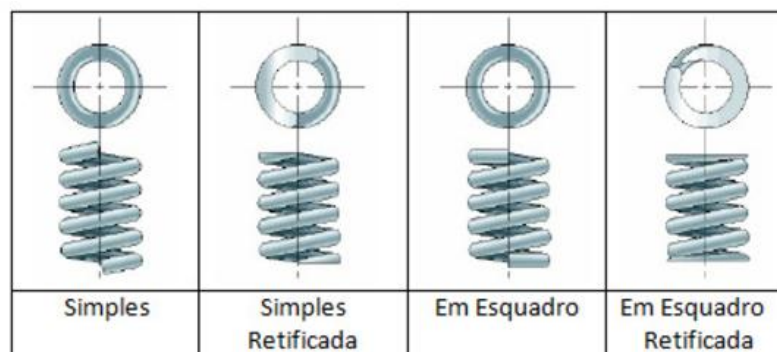
Devido à ampla gama de molas encontradas no mercado, se fará a abordagem apenas da mola abordada no presente trabalho, que é a do tipo helicoidal de compressão.

2.1.1 Molas helicoidais de compressão

Segundo Servimolas (2017), as molas helicoidais de compressão são projetadas de modo a acumular forças durante a sua compressão e exercê-las no sentido de “empurrar”. São construídas no formato helicoidal paralelo ou cônico.

As extremidades das molas de compressão são preparadas conforme a necessidade de aplicação, para proporcionar maior estabilidade e assentamento na base que irá sustentá-la. Os tipos de extremidades de tais molas de compressão podem ser observados na figura 1.

Figura 1 - Extremidade de molas helicoidais de compressão.



Fonte: Servimolas, 2017.

2.2 ENSAIOS MECÂNICOS

2.2.1 Ensaio de compressão

No ensaio de compressão o corpo de prova é testado pela aplicação de uma carga axial compressiva sobre a mola. Através de sensores presentes no equipamento Autograph AG-X de 50 kN da Shimadzu (figura 4), a deformação da mola é medida conforme a carga (figura 3) aumenta, permitindo a construção do diagrama tensão–deformação.

Figura 2 - Autograph AG-X em operação.



Fonte: produção do próprio autor.

Figura 3- Célula de carga de 50 kN da AG-X.



Fonte: produção do próprio autor.

Figura 4 - Autograph AG-X de 50 kN da fabricante Shimadzu.



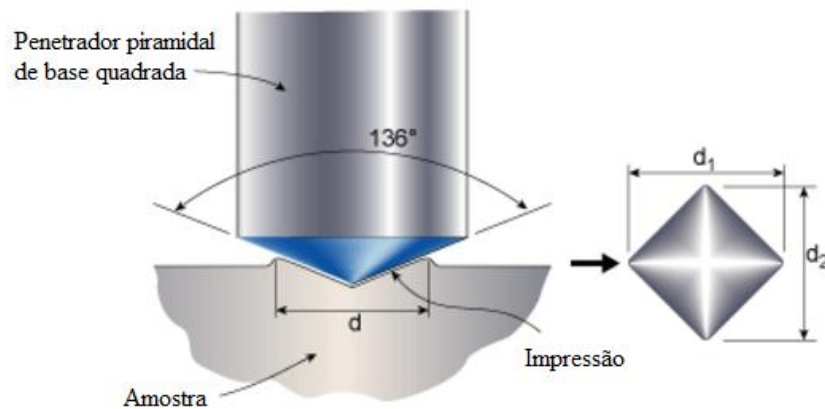
Fonte: produção do próprio autor.

Segundo Cimm(2017), materiais dúcteis e materiais frágeis, especificamente metais, comportam-se diferentemente no ensaio de compressão. Enquanto os metais frágeis rompem praticamente sem fase elástica, os metais dúcteis sofrem grande deformação na fase plástica, às vezes sem atingir a ruptura.

2.2.2 Ensaio de dureza Vickers de baixa força

O termo “teste de dureza” usualmente se refere à impressões estáticas provocadas por cargas entre 1 kg e 100 kg, sendo considerado de baixa força quando as cargas estiverem entre 0,2 kg e 5 kg (EMCOTEST, 2017). No ensaio em questão, o penetrador é pressionado com uma carga pré-determinada sobre a amostra, deixando assim uma marcação que terá suas dimensões medidas para determinar a dureza específica do material. O penetrador para tal ensaio foi a pirâmide de diamante Vickers, que pode ser observada, esquematicamente, na figura 5.

Figura 5 - Penetrador piramidal de base quadrada.



Fonte: Weebly, 2017.

Ainda segundo Cimm(2017), a carga plena é aplicada normalmente durante um tempo de 10 até 15 segundos. As duas diagonais da marcação deixada na superfície do material depois da remoção da carga são medidas usando-se um microscópio. Com os valores lidos calcula-se a média aritmética. A seguir calcula-se a área da superfície inclinada da impressão. A dureza Vickers é o quociente obtido dividindo a carga (em kgf) pela área da impressão.

A superfície a ser testada geralmente requer um acabamento metalográfico. Quanto menor a carga de teste, maior o grau de acabamento superficial necessário.

O teste é aplicável a uma grande gama de materiais, dos mais moles aos mais duros, com ampla faixa de ajuste de cargas. A única desvantagem do teste é a máquina de medição(figura 6), que é maior e mais cara que as correspondentes para os testes Brinell e Rockwell.

Figura 6 - Durômetro utilizado no ensaio de dureza Vickers de baixa força.



Fonte: produção do próprio autor.

Além do domínio das etapas citadas acima, para a correta realização deste trabalho também foi necessário o uso de conhecimentos de projeto de máquinas. Tal área do conhecimento, quando analisada conjuntamente com as demais, permite um exame profundo do corpo de prova, e validação dos diversos procedimentos de análise disponíveis.

2.2.3 Ensaio de espectrometria por emissão atômica

No ensaio de espectrometria por emissão atômica, uma corrente elétrica passa através do corpo de prova, causando a excitação dos elétrons e conseqüentemente, seu movimento para camadas eletrônicas mais externas (estado excitado). A tendência do material é retornar a posição de equilíbrio, esse retorno associado ao eletrodo de tungstênio causa a emissão de feixes de luz, que são captados pelos sensores do espectrômetro (figura 7) e, de acordo com o comprimento de onda característico de cada elemento químico, são convertidos em sinal digital, que é analisado pelo software específico do equipamento e transformados em porcentagem de massa.

Figura 7 - Espectrômetro de emissão atômica.



Fonte: produção do próprio autor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DEFINIÇÃO DA PROPOSTA E CONSIDERAÇÕES

Este trabalho tem como proposta realizar a análise estática de uma mola helicoidal de compressão, e, para tanto, tal análise foi dividida nos seguintes itens:

- Realizar os ensaios mecânicos utilizando os equipamentos necessários;
- Calcular as mesmas propriedades obtidas experimentalmente através do equacionamento presente na literatura;
- Realizar a comparação entre resultados experimentais e calculados a fim de validar os resultados obtidos.

3.2 INFRAESTRUTURA DE PROCESSAMENTO

Para a realização deste trabalho, o uso de alguns softwares e equipamentos foi necessário.

Softwares:

- Microsoft Excel 2010 para as tabelas;
- Trapezium X, para o ensaio de compressão;
- Ecos Workflow, para o ensaio de dureza Vickers de baixa força;
- WinOE, para o ensaio de espectrometria por emissão atômica.

Equipamentos:

- ARL 3460 Metals Analyser da empresa Thermo, para a espectrometria;
- Autograph AG-X, 50 kN da fabricante Shimadzu, para o ensaio de compressão;
- EMCOTEST DuraScan 50 da fabricante emcotest, para o ensaio de dureza Vickers de baixa força;
- Paquímetro digital da fabricante Mitutoyo, para as medições;
- Embutidora Mecapress 3 da fabricante Presi, para o embutimento das amostras utilizadas no ensaio de dureza Vickers de baixa força.

3.3 DADOS DA MOLA

A mola analisada no presente trabalho é do tipo helicoidal de compressão e foi extraída de um amortecedor traseiro de bicicleta, da empresa WG Sports, adquirida em uma loja de

equipamentos esportivos, chamada Casa da Fazenda, em Guaratinguetá. O amortecedor em questão pode ser observado na figura 8.

Esta mola se mostrou como uma ótima alternativa para o presente estudo, uma vez que possui propriedades simples, permitindo uma abordagem mais didática além de estar presente no dia a dia de inúmeras pessoas.

Figura 8 - Amortecedor traseiro de bicicleta WG Sports.



Fonte: produção do próprio autor.

Figura 9 - Amortecedor desmontado.



Fonte: produção do próprio autor.

3.3.1 Medições

A mola foi medida utilizando um paquímetro digital da fabricante Mitutoyo, sendo que, através da correta manipulação do mesmo e usando-se a graduação em milímetros, foram obtidas as medidas da mola, que podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Medições da mola helicoidal de compressão.

Medida	Diâmetro externo De [mm]	Diâmetro interno Di [mm]	Altura H [mm]	Diâmetro do arame d [mm]	Distância entre espiras de [mm]	Passo P [mm]
1	43,35	28,85	100,61	7,27	14,23	21,50
2	43,37	28,75	99,64	7,27	13,91	21,18
3	43,43	28,74	100,66	7,31	14,76	22,03
Média	43,38	28,78	100,30	7,28	14,30	21,57

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 10- Dimensões de uma mola helicoidal de compressão.

De: diâmetro externo;

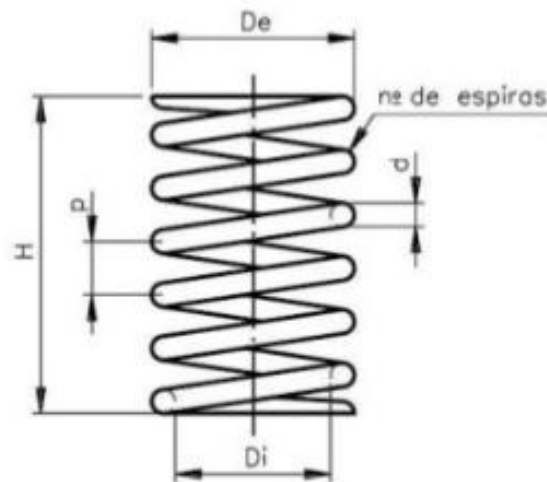
Di: diâmetro interno;

H: comprimento da mola;

d: diâmetro da seção do arame;

p: passo da mola;

nº: número de espiras da mola.



Fonte: Bremenkamp (2013)

A medição do passo (p) da mola através do paquímetro foi impraticável, uma vez que a distância entre espiras é estreita e a bitola do fio possui um diâmetro considerável, o que impediu o acesso do paquímetro. Sendo assim, para obter tal medida, a distância entre espiras (de) foi somada a uma vez o diâmetro do arame (d).

Com relação ao material da mola, não foi possível encontrar as especificações da mesma nem se localizou um contato para entrar em contato com o fornecedor. Sendo assim, com este trabalho, almeja-se também definir qual o material compositor da mola.

3.4 ENSAIOS MECÂNICOS E QUÍMICO

3.4.1 Ensaio de compressão

- Resumo

O ensaio consiste na aplicação de uma carga uniaxial crescente à mola abordada neste trabalho, ao mesmo tempo em que são medidas as variações no comprimento. Com as informações da variação do carregamento e da deformação à qual a mola foi submetida, determina-se a curva tensão deformação, sendo possível então a determinação do coeficiente de elasticidade da mola.

- Componentes utilizados no ensaio

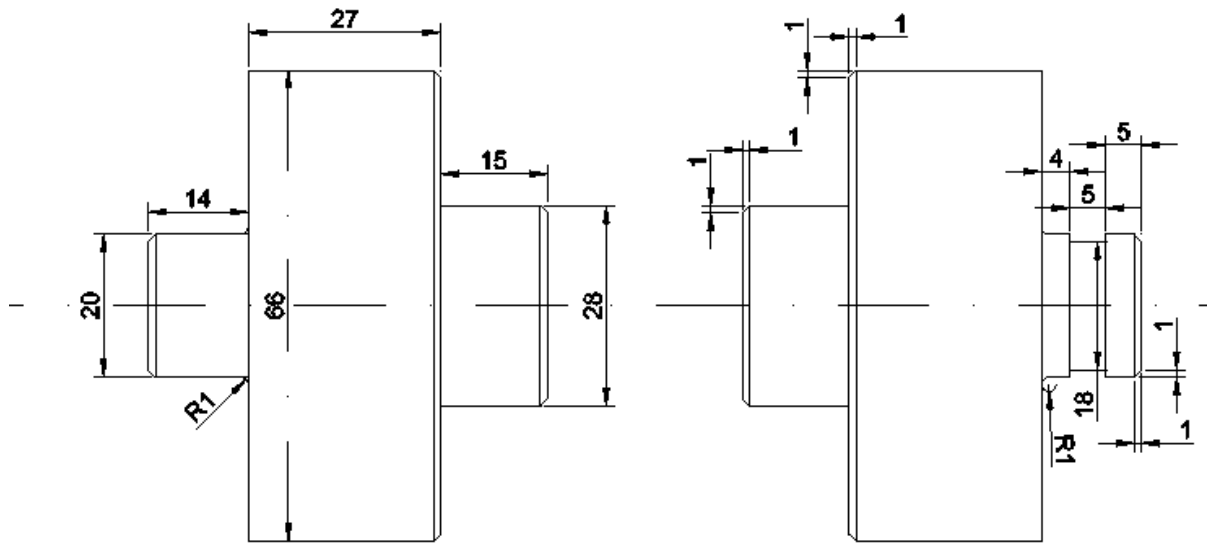
- » Máquina de Teste

Autograph AG-X, 50 kN da fabricante Shimadzu: Segundo informações da própria fabricante, a AG-X é capaz de realizar ensaios de alto nível de resolução de controle, o que oferece uma notável diferença em baixas velocidades garantindo que os resultados são reais além de maior segurança na realização do ensaio. Apresenta também amostragem super rápida além de uma ampla faixa de forças na célula de carga, o que reduz o tempo dos ensaios. Também segundo a fabricante, a Autograph AG-X está em conformidade com as normas JIS B7721 Class 1, JIS B7733 Class 1, EN 10002-2 Grade 1, ISO 7500-1 Class 1, BS1610 Class 1, DIN51221 Class 1, e ASTM E4.

- » Bases da mola

Duas bases tiveram que ser usinadas especificamente para o ensaio, uma vez que os suportes padrão não forneciam a estabilidade necessária para a mola, incorrendo no risco da mesma flambar durante o ensaio. As bases em questão foram usinadas no departamento de Mecânica da UNESP obedecendo às medidas dos suportes padrão do equipamento, que podem ser observados na figura 11.

Figura 11 - Esboço 2D das bases da mola.



Fonte: produção do próprio autor.

Estas medidas foram tiradas das bases originais do equipamento com o mesmo paquímetro digital utilizado para aferir as medidas da mola. Após a etapa de usinagem, foram obtidas as bases exibidas na figura 12.

Figura 12 - Bases usinadas utilizadas no ensaio de compressão.



Fonte: produção do próprio autor.

Figura 13 - Comparativo do tamanho das bases com relação à mola.



Fonte: produção do próprio autor.

Onde os pinos menores são encaixados e travados no equipamento e os maiores servem de guia e apoio para a mola.

» Mola helicoidal de compressão da fabricante WG Sports, utilizada em amortecedores traseiros de bicicleta.

- Procedimento

Com as bases prontas, as mesmas foram inseridas no equipamento. Deve-se levar em consideração que a base que será fixada na bandeja superior móvel, da AG-X possui uma ranhura de 5 mm de profundidade ao redor do pino de encaixe, para que o pino fixador da AG-X trave a base e a mesma não caia.

A segunda base possui um pino liso, uma vez que ela será encaixada na bandeja inferior fixa do equipamento. A mola é encaixada no suporte de mola da base inferior e a bandeja superior é aproximada da inferior utilizando da aproximação manual da AG-X até que a mola fique fixa. É importante lembrar que a mola foi apenas fixada e nenhuma pré-carga foi aplicada. Com esta etapa finalizada, a configuração do equipamento antes do início do ensaio ficou como na figura 14.

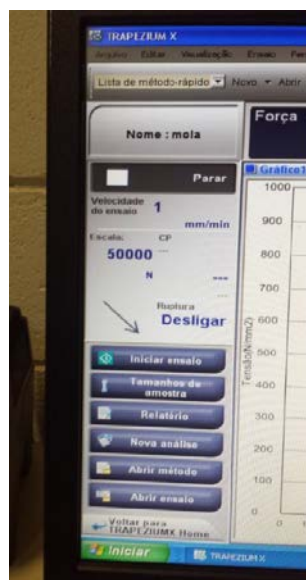
Figura 14 – Autograph AG-X após encaixe das bases e fixação da mola.



Fonte: produção do próprio autor.

A seguir, as condições do ensaio (figura 15) foram definidas no software Trapezium X. A velocidade de ensaio utilizada foi de 1 [mm/min], a escala utilizada foi de 50000 [N], o modo de ensaio selecionado foi o Simples, o tipo de ensaio selecionado foi Compressão, sistema de unidades no SI, e o tipo de gráfico gerado ajustado para tensão x deslocamento bem como a tabela de resultados gerada para força x deslocamento.

Figura 15 - Tela do software Trapezium X para configuração do ensaio de compressão.



Fonte: produção do próprio autor.

Com estes parâmetros ajustados, selecionou-se “iniciar ensaio” e o mesmo foi realizado até a força aplicada ficar em torno de 2500 N o que permitiu se obter os dados desejados.

3.4.2 Ensaio de dureza Vickers de baixa força

- Resumo

Para a realização deste ensaio, foi necessária primeiramente a obtenção de amostras retiradas da mola. Foram obtidas 2 seções da mola, uma longitudinal e uma transversal ao fio da mola, sendo que ambas foram embutidas e tiveram suas faces apropriadamente preparadas por lixamento e polimento para posteriormente serem ensaiadas. Vale ressaltar que todos os procedimentos realizados neste trabalho seguiram normas regulamentadoras, a fim de se obterem resultados verídicos.

- Componentes utilizados no ensaio

- » Máquina de Teste

DuraScan 50, da fabricante Emcotest: De acordo com a fabricante, o DuraScan 50 é capaz de realizar ensaios Vickers e Knoop automaticamente, eliminando assim a atuação do operador durante o ensaio. É capaz também de trocar lentes e penetradores, mudar métodos de teste rapidamente, aplicar foco na impressão deixada na amostra, além de gerar imagens de alta resolução a fim de se obter resultados precisos. Vale ressaltar que o DuraScan 50 esta calibrado conforme as normas ISO 6507, ASTM E-92, ASTM E-384.

- » Penetrador

O penetrador utilizado (figura 16) foi um diamante na forma de uma pirâmide reta com base quadrada, cujos ângulos entre faces opostas são de 136 graus com imprecisão de +/- 0,5°, conforme norma ISO 6507-2.

Figura 16 - Penetrador piramidal de base quadrada utilizado no ensaio.



Fonte: produção do próprio autor.

» Amostra

Para que a amostra fosse obtida, primeiramente foram retiradas 2 amostras da mola, uma através de um corte longitudinal e outra através de um corte transversal ao fio da mola.

Com as amostras já retiradas, ambas foram embutidas em baquelite, conforme descrição a seguir.

● Embutimento a quente

Quando a amostra é embutida em materiais termoplásticos por meio de prensas, utiliza-se pressão e aquecimento para efetuar a polimerização destes materiais.

Sendo assim, o método em questão consistiu basicamente em colocar a amostra com a face que se desejava analisar em contato com o êmbolo inferior do embutidor Mecapress 3 (figura 17). Feito isto, colocou-se determinado número de medidas padrão de resina sobre a amostra apoiada no êmbolo, dentro da câmara de embutimento, vedando-se a seguir a abertura da câmara. Por fim, acionou-se o equipamento, que fora configurado previamente para aplicar a pressão por determinado tempo, ambos padronizados e informados na tabela 2.

Figura 17 - Embutidor Mecapress 3.



Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 2 - Parâmetros de embutimento a quente.

Tipo de Plástico	Cor	Nº Medidas	Pressão [Kgf/mm ²]	Tempo de Aquecimento [min]	Tempo de Resfriamento [min]
Baquelite	Vermelha	5	125 a 150	10	5

Fonte: Rohde, Regis Almir, 2017.

No presente trabalho, como o material termoplástico adotado foi o baquelite, o tempo de aquecimento utilizado foi de 10 minutos e o tempo de resfriamento foi de 5 minutos. Vale lembrar que este ensaio foi realizado segundo a NBR 13284 (Norma para ensaios de metalografia).

Com a amostra embutida, a próxima etapa realizada foi o lixamento.

- Lixamento

Devido à elevada exigência do grau de acabamento superficial requerido de uma amostra idealmente preparada, foi essencial que o lixamento fosse executado cautelosamente, pois era um dos processos mais demorados para a preparação das amostras. Esta operação teve por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície da amostra, dando um bom acabamento e preparando-a para o polimento. A amostra foi lixada manualmente, na bancada com disco rotativo (figura 18), com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até que desaparecessem os traços da anterior.

A sequência de lixas utilizada foi: 220, 320, 400 e 600. Para se conseguir um lixamento eficaz foi necessário o uso adequado da técnica, pois, devido à natureza da amostra, à pressão de trabalho e à velocidade de lixamento, caso o lixamento fosse inapropriado, surgiriam deformações plásticas na superfície da amostra por amassamento e aumento de temperatura. Esses fatores poderiam causar deformações na imagem obtida com o ensaio. Para evitar isso, os seguintes cuidados foram tomados:

- A superfície da amostra deveria estar rigorosamente limpa, isenta de líquidos e graxas que pudessem provocar reações químicas na superfície;
- Riscos profundos que surgissem durante o lixamento, deveriam ser eliminados por novo lixamento.

Figura 18 - Mesa de lixamento para preparação da amostra a ser ensaiada.



Fonte: produção do próprio autor.

- Polimento

O processo de polimento foi análogo ao processo de lixamento, pois utilizou-se a mesma bancada e método.

Após o lixamento, a bancada para polimento passou a ser utilizada. O pano para polimento de 6μ da fabricante Buhler foi colocado no disco rotativo e a pasta de diamante de 6μ (Figura 19) foi aplicada no pano. Ligou-se então o disco rotativo da bancada e a seguir a amostra foi pressionada contra o pano de polimento até que os riscos da amostra desaparecessem.

Repetiu-se então esta etapa, porém com o pano de 3μ e com a pasta de diamante de 3μ . A pasta de 3μ garante que a amostra apresente um aspecto brilhante, o que facilitou no momento da análise de dureza.

Figura 19 - Pasta de diamante de 3μ para polimento da amostra a ser ensaiada.



Fonte: produção do próprio autor.

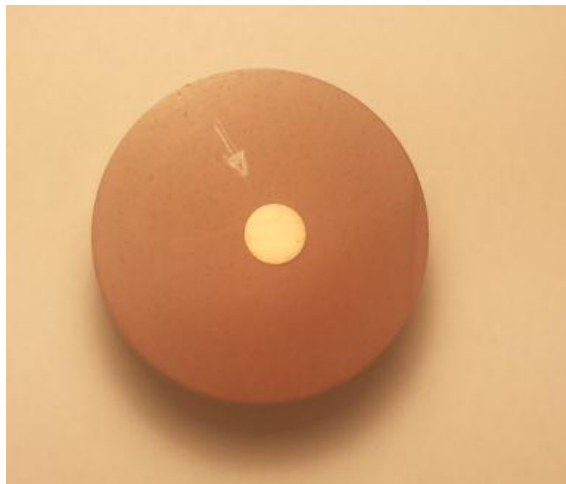
Com todos os preparativos realizados, foram obtidos os 2 corpos de prova apresentados na figura 20 e na figura 21.

Figura 20 - Amostra da sessão longitudinal do arame da mola helicoidal de compressão.



Fonte: produção do próprio autor.

Figura 21 - Amostra da sessão transversal do arame da mola helicoidal de compressão.



Fonte: produção do próprio autor.

Com os 3 componentes preparados, partiu-se então para o procedimento experimental.

- Procedimento

Com as amostras prontas, ligou-se o durômetro DuraScan 50 e selecionou-se o tipo de análise de dureza a ser realizada, a carga, o zoom, a lente e a quantidade de pontos de

medição, no caso do presente trabalho, dureza Vickers, 0,5 [Kg], zoom 40X, lente objetiva e 9 pontos de medição, respectivamente.

Com os parâmetros de análise selecionados, posicionou-se a amostra e ajustou-se o equipamento de modo que o ponto central da lente do mesmo estivesse posicionado sobre ponto central da amostra. Feito isto, bastou iniciar o aparelho para que o mesmo realizasse as medições automaticamente, gerando a seguir um arquivo em Excel com os valores obtidos.

Lembrando que o presente ensaio é realizado conforme procedimento e norma operacional internos da empresa onde foi realizado e conforme normas ISO 6507 e ASTM E384.

3.4.3 Ensaio de espectrometria por emissão atômica

- Resumo

O método de espectrometria por emissão atômica consistiu em determinar a presença e quantidade dos elementos presentes na amostra, usando como princípio a absorção de radiação ultravioleta por parte dos elétrons presentes na mesma.

Para tanto, foi necessário primeiramente, extrair uma nova amostra da mola tema do presente estudo. Tal amostra precisou ser adaptada a fim de se ajustar ao suporte de amostras do espectrômetro e às condições necessárias para a realização do ensaio de maneira apropriada.

- Componentes utilizados no ensaio

- » ARL 3460 MetalsAnalyzer

O equipamento é composto por:

a) Fonte de excitação: obtida através da descarga de um capacitor capaz de fornecer parâmetros elétricos para acionar a amostra.

b) Câmara de faísca: automaticamente lavada com argônio. A câmara de faísca foi montada diretamente no espectrômetro e estava equipada com um suporte de faísca para conter a amostra plana e um contra eletrodo inferior com forma de haste.

- c) Linhas espectrais:** Linhas espectrais e padrões internos foram utilizados para carbono e aço de baixa liga. O espectrômetro deve ser capaz de medir pelo menos uma das linhas espectrais listadas para cada um dos elementos componentes da amostra. Podem ser utilizadas linhas espectrais diferentes das padronizadas desde que se possa demonstrar experimentalmente que se obtém precisão e exatidão equivalentes.
- d) Sistema de medição:** o espectrômetro é capaz de converter intensidades de luz em sinais elétricos mensuráveis. O sistema de medição do ARL 3460 utiliza um conjunto de sensores semicondutores, capazes de registrar a radiação emitida.
- e) Bomba de vácuo:** capaz de manter o sistema em um vácuo de 3,33 Pa
- f) Sistema de Gás:** constituído por uma fonte de argônio com regulagem de pressão e fluxo. O argônio, neste caso, é utilizado para impedir reações de oxidação durante a excitação. (ASTM E406)
- g) Software WinOE:** Software padrão do equipamento para a realização do ensaio.

- Amostra

A amostra (figura 22) foi uma seção transversal ao fio da mola extraída de uma altura de 1/4 da altura da mola helicoidal, com o uso de uma serra mecânica. A amostra a ser analisada foi endireitada com um trefilador e lixada com uma lixadeira de fita a fim de ser fixada no suporte de amostras do espectrômetro.

A amostra final possuía 38,30[mm] de comprimento e 7,20[mm] de diâmetro, correspondente à seção transversal da mola.

Para realização do ensaio era necessário que a amostra possuísse um diâmetro adequado para sobrepôr e selar o furo de abertura da câmara de faísca, estar com um comprimento entre 10 e 38 mm além de ser lixada, de modo a retirar resquícios de oxidação que pudessem estar depositados sobre a amostra. Tal amostra foi obtida seguindo a norma ASTM E 1806.

Figura 22 - Amostra utilizada no ensaio de espectrometria.



Fonte: produção do próprio autor.

- Suporte

O suporte (figura 23) é basicamente uma placa ajustável com castanhas, semelhantes às de um torno, capaz de comportar diversos diâmetros de corpos de prova. No ensaio em questão, entretanto, o diâmetro de fechamento da castanha foi o suficiente para suportar a amostra perpendicularmente à mesa de análise do espectrômetro.

Figura 23 - Suporte da amostra utilizada no ensaio de espectrometria.



Fonte: produção do próprio autor.

- Procedimento

Para se realizar a análise da amostra, o ARL foi submetido a 3 etapas prévias, para garantir que os resultados sejam precisos. Explicá-las não será o escopo do trabalho, entretanto é necessário realizar uma breve introdução para que a explicação do experimento seja mais clara.

- a) **Limpeza do equipamento:** A fim de garantir a remoção de qualquer particulado residual, bem como a limpeza do filtro, para evitar medições errôneas e adulteradas devido presença de corpos estranhos à amostra.
- b) **Purga do sistema de argônio:** Para eliminar resíduos de argônio que possam ter permanecido após o termino do ensaio anterior.
- c) **Calibração:** Para garantir que o equipamento esteja de acordo com a norma regulamentadora ASTM E415.

Com esta etapa concluída, partiu-se para a análise do material.

Primeiramente, o software WinOE foi inicializado e configurou-se o programa para que o ensaio fosse realizado da maneira desejada.

Selecionou-se inicialmente Produção/Análises e definiu-se Análise em concentração. A seguir o ensaio foi nomeado de Análise Metalográfica: Mola Helicoidal e a amostra foi presa ao suporte, sendo posicionada com a área previamente preparada voltada para a mesa de análise. Vale lembrar que, a fim de se obterem resultados precisos, foi necessário que a face a ser analisada fosse posicionada de modo a cobrir completamente o furo da abertura da câmara de faísca. A seguir os eletrodos de tungstênio foram fixados em ambas as extremidades planas da amostra e a câmara onde a análise seria realizada foi fechada e selada. Para concluir, o botão Iniciar Análise foi selecionado.

Transcorrido o tempo da análise, bastou selecionar Concluir, e o ensaio foi finalizado.

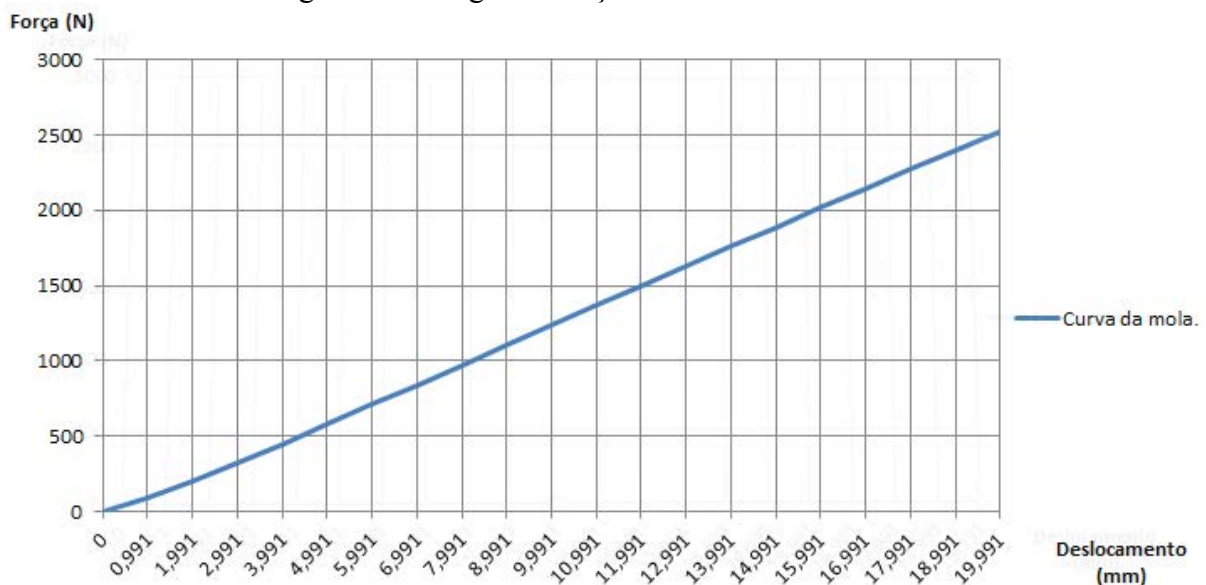
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO

4.1.1 Resultados experimentais

Após o ensaio, as informações coletadas pelo software Trapezium X foram agrupadas em uma tabela força x deslocamento, a partir da qual, com o auxílio do excel, foi possível traçar o diagrama força x deslocamento, apresentado na figura 24.

Figura 24 - Diagrama força x deslocamento da mola.



Fonte: produção do próprio autor.

4.1.2 Resultados calculados

Os valores utilizados na equação 2 (Norton, 2013) para determinar o valor experimental de k , foram os pontos p2 (11,991;1500) e p1(4,991;580), em destaque na tabela 3.

Com esta equação, tem-se:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta y} \text{ (Eq. 2)} \quad k = \frac{1500 - 580}{(11,991 - 4,991) \times 10^{-3}} = \frac{920}{7,0 \times 10^{-3}} \frac{N}{m} = 131.428,57 \text{ N/m}$$

Para determinação do k da mola pelo método analítico, utilizou-se a relação presente na equação 3 (Norton, 2013):

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

Onde:

d: é o diâmetro do arame;

G: é o módulo de cisalhamento do material, possuindo o valor de $G=80,8$ GPa de acordo com a tabela A-1 do Norton (2013);

D: é o diâmetro médio da mola; e

N_a : é o número de espiras ativas na mola, definida segundo a tabela 4, como:

$$N_a = \frac{H-2d}{p} \text{ (esmerilhada e esquadrejada)}, N_a = \frac{100,3-2 \times 7,28}{21,5} = 3,988 \cong 4 \text{ espiras ativas}$$

Tabela 3 - Diretrizes para caracterização dimensional de molas de compressão.

Características dimensionais	Tipos de extremidade			
	Aberta ou Plana (sem esmerilhar)	Aberta ou Plana (esmerilhada)	Apenas Esquadrejada	Esmerilhada e Esquadrejada
Altura Fechada (Ls)	$(N_t + 1).d$	$N_t.d$	$(N_t + 1).d$	$N_t.d$
Passo (p)	$(H-d) / N_a$	H / N_t	$(H - 3.d) / N_a$	$(H - 2.d) / N_a$
Espiras Ativas (N_a)	$(H - d) / p$	$(H / p) - 1$	$(H - 3.d) / p$	$(H - 2.d) / p$
Espiras Totais (N_t)	N_a	$N_a + 1$	$N_a + 2$	$N_a + 2$
Comprimento Livre (H)	$p.H + d$	$p. N_t$	$p.N_a + 3.d$	$p.N_a + 2.d$

Fonte: Associated Spring. Barnes Group Inc., 1987.

Da equação 3 e com os valores medidos diretamente através da mola, tem-se:

$$k = \frac{(7,28 \times 10^{-3})^4 \cdot 80,8 \times 10^9}{8 \cdot (36,08 \times 10^{-3})^3 \cdot 4} = \frac{226,95}{1,503 \times 10^{-3}} \frac{N}{m} = 151.001,28 \text{ N/m}$$

4.1.3 Comparação

Comparando-se ambos os resultados, pode-se observar uma diferença de 12,96% entre o k da mola experimental e o calculado. Esta diferença pode ser devido a uma série de fatores, dentre eles:

- 1) Imprecisão na definição do N_a (espiras ativas) utilizada no cálculo de k. Além dos problemas encontrados para uma precisa determinação das medidas da mola, pode-se observar que o cálculo do valor de N_a não retorna um número inteiro, tendo sido utilizado na verdade um arredondamento.
- 2) Incerteza do instrumento de medição, todo instrumento de medição, independente de ser uma régua, paquímetro, micrometro, etc, apresenta uma incerteza. No presente caso, a

imprecisão do paquímetro digital da Mitutoyo utilizado para aferir as medidas da mola pode contribuir, mesmo que minimamente, para a diferença dos resultados. Vale lembrar que a diferença de resultados é muitas vezes devido a um conjunto de fatores e imprecisões que isoladamente não tem um impacto significativo, mas que somadas representam um desvio considerável.

3) Imprecisão do equipamento utilizado no ensaio de compressão. Todo equipamento utilizado em ensaios apresenta incertezas e se descalibra com o uso e o tempo, carecendo de uma calibração a fim de que retorne aos intervalos aceitáveis estabelecidos por agências regulamentadoras. No presente trabalho, o equipamento utilizado nunca foi calibrado, sendo assim, apesar de não ser possível se estimar a imprecisão, pode-se admitir que esta existe e que contribui grandemente para uma divergência no resultado final.

4) O cálculo do módulo de elasticidade foi feito considerando que o material da mola é composto exclusivamente de aço carbono, entretanto o objeto de estudo apresenta um revestimento de um material diferente do material da mola, o que impactou na maneira como a mesma reagiu durante o ensaio de compressão.

5) Uma vez que o objeto de estudo é proveniente de uma fabricante chinesa, pouco conhecida no mercado, não se sabe ao certo como a mola foi feita, se a mesma segue padrões e normas de fabricação reconhecidas, nem mesmo é possível aferir se a mola apresenta dimensões constantes ao longo dela toda. Caso tais padrões e normas não sejam atendidos, os resultados obtidos posteriormente podem ser comprometidos.

6) Os dados utilizados para a confecção do diagrama força x deslocamento foram arredondados e posteriormente plotados no gráfico, para somente então serem tomados os pontos utilizados para cálculo do k experimental. Todos esses fatores conferem certa imprecisão à tomada de dados, que pode impactar no resultado final da constante elástica da mola;

7) Valor do módulo de cisalhamento varia conforme a literatura utilizada.

4.2 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

4.2.1 Resultados experimentais

Após o ensaio ter sido realizado, usando-se as amostras com as sessões longitudinais e transversais, foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 4 - Resultado do ensaio de dureza Vickers na seção transversal da mola.

Ponto de Teste	Método	HV
1	HV 0,5 kg	354
2	HV 0,5 kg	422
3	HV 0,5 kg	413
4	HV 0,5 kg	385
5	HV 0,5 kg	379
6	HV 0,5 kg	415
7	HV 0,5 kg	377
8	HV 0,5 kg	379
9	HV 0,5 kg	399

Fonte: produção do próprio autor.

Tabela 5 - Resultado do ensaio de dureza Vickers na seção longitudinal da mola.

Ponto de Teste	Método	HV
1	HV 0,5 kg	387
2	HV 0,5 kg	406
3	HV 0,5 kg	404
4	HV 0,5 kg	381
5	HV 0,5 kg	387
6	HV 0,5 kg	402
7	HV 0,5 kg	393
8	HV 0,5 kg	391
9	HV 0,5 kg	399

Fonte: produção do próprio autor.

Este ensaio retorna o resultado como dureza Vickers, entretanto, o que será usado neste trabalho é seu valor convertido para dureza Brinell, visto que, segundo Norton(2013) há uma maneira muito conveniente de estimar o limite de resistência à tração (S_{ut}) do material, através da equação 4(Norton, 2013):

$$S_{ut} \cong 3,45 HB \pm 0,2 HB \text{ MPa} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

S_{ut} : limite de resistência à tração; e HB: dureza Brinell.

A unidade de dureza absoluta é $\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$. Valores de dureza Brinell e Vickers também tem essa unidade, apesar de que os valores medidos em uma mesma amostra podem variar dependendo do método. As escalas Brinell e Vickers não são linearmente relacionadas, entretanto, a tabela 8 mostra conversões aproximadas entre as durezas nas escalas, para aços.

Tabela 8 - Tabela de conversão entre durezas Brinell e Vickers.

HB	HV
401	425
375	396
341	360
311	328

Fonte: Norton, 2013.

Com esta tabela, foi possível obter o valor da dureza Brinell para as amostras analisadas, bem como o cálculo do respectivo S_{ut} , conforme é possível observar nas tabelas abaixo:

Tabela 6 - Dureza Brinell e S_{ut} para o corte transversal da mola de compressão.

Ponto de Teste	Hardness Vickers	Hardness Brinell	Sut (MPa)
1	354	335,4	1224,21
2	422	398,3	1453,80
3	413	390,2	1424,23
4	385	364,6	1330,79
5	379	358,9	1309,99
6	415	392,0	1430,80
7	377	357,1	1303,42
8	379	358,9	1309,99
9	399	377,7	1378,61

Fonte: produção do próprio autor.

Destes valores, foi extraído o S_{ut} Médio Transversal: $S_{ut}^{MT} = 1351,76$ [MPa]

Tabela 7 - Dureza Brinell e Sut para o corte longitudinal da mola de compressão.

Ponto de Teste	Hardness Vickers	Hardness Brinell	Sut (MPa)
1	387	366,50	1337,73
2	406	384	1401,6
3	404	382,2	1395,03
4	381	360,8	1316,92
5	387	366,5	1337,73
6	402	380,4	1388,46
7	393	372,2	1358,53
8	391	370,3	1351,6
9	399	377,7	1378,61

Fonte: produção do próprio autor.

Destes valores, foi extraído o S_{ut} Médio Longitudinal: $S_{ut}ML = 1362,91$ [MPa]

Analisando tanto o $S_{ut}MT$ e $S_{ut}ML$, obteve-se um valor final médio de:

$$S_{ut} = 1357,63 \text{ [MPa]}$$

4.2.2 Resultados calculados

Além do método experimental, o S_{ut} pode ser calculado através da equação 5, encontrada no livro Projeto de Maquinas (Norton, 2013):

$$S_{ut} = A \cdot d^b \quad (\text{Eq. 5})$$

onde:

d é a bitola ou diâmetro do arame medido em [mm] e A e b são coeficientes definidos na tabela 10 para materiais de arame nos intervalos de diâmetro especificados.

Tabela 8 - Coeficientes e expoentes para o cálculo do S_{ut} .

No. ASTM	Material	Intervalo		Expoente b	Coeficiente A		Fator de correlação
		[mm]	[in]		[MPa]	[psi]	
A227	Repuxado a frio	0,5 - 16	0,020 - 0,0625	-0,1822	1753,30	141040	0,9980
A228	Fio musical	0,3 - 6	0,010 - 0,250	-0,1625	2153,50	184649	0,9997
A229	Revenido em óleo	0,5 - 16	0,020 - 0,625	-0,1835	1831,20	146780	0,9990
A232	Cromo-x	0,5 - 12	0,020 - 0,500	-0,1453	1909,90	173128	0,9980
A401	Cromo-s	0,8 - 11	0,031 - 0,437	-0,0934	2059,20	220779	0,9910

Fonte: Norton, 2013.

Como será apresentado mais a frente, no experimento de espectrometria realizado sobre o material da mola de compressão, constatou-se que o mesmo é um aço SAE 1070, que não é contemplado pelas opções fornecidas pelo livro. Sendo assim, a fim de dar seguimento ao presente trabalho, foi assumido para o cálculo do S_{ut} os coeficientes do aço ASTM A227 (equivalente a um SAE 1066). Das opções disponíveis, este material é o que retorna o resultado mais próximo do desejado.

As propriedades foram tomadas considerando que o aço 1066 foi repuxado a frio (encruado) o que, segundo Norton(2013) torna o fio de mola mais barato, sendo de um uso mais geral e adequado para carregamentos, porém inadequado para carga de fadiga ou impacto.

Da tabela 11 retirou-se:

$$A = 1753,3 \text{ [Mpa]}$$

$$b = -0,1822$$

Estes valores, associados ao diâmetro de arame de 7,28 [mm] medido anteriormente e com a equação 2, definem o valor de S_{ut} como sendo:

$$S_{ut} = 1753,3 * (7,28)^{-0,1822} = 1221,17 \text{ [MPa]}$$

4.2.3 Comparação

Comparando-se o S_{ut} experimental com o calculado, tem-se que o S_{ut} experimental é 10,05% maior que o calculado. Esta disparidade pode ser devido a alguns fatores, como:

- 1) Desconhecimento do tratamento térmico que foi realizado sobre a mola durante sua fabricação, o que impacta diretamente na dureza e conseqüentemente nos resultados de S_{ut} obtidos experimentalmente.
- 2) Na ausência de valores tabelados para as constantes A e b, durante o cálculo do S_{ut} , aproximou-se tais valores para os do aço SAE 1066 ao invés do SAE 1070, apresentando também uma fonte de imprecisão. O uso de um material mais comumente utilizado no mercado talvez fosse uma abordagem mais interessante.
- 3) Imprecisões e incertezas nas conversões de Vickers para Brinell (visto que os valores tabelados são aproximações);

4) Incerteza do paquímetro digital utilizado para medição do diâmetro do arame, além de não se saber ao certo se a mola possui variações dimensionais ao longo de todo seu comprimento;

Observação 1: Para o cálculo do S_{ut} foi considerada a média entre os valores dos 9 pontos de medição para ambas as amostras, tanto longitudinal como transversal.

Observação 2: Neste ensaio, desconsiderou-se erros de calibração do microdurômetro pois o mesmo passa por uma rotina diária de calibração.

4.3 ENSAIO DE ESPECTROMETRIA POR EMISSÃO ATÔMICA

4.3.1 Resultados experimentais

Concluído o experimento, os resultados obtidos foram impressos, podendo ser encontrados na tabela 11.

Tabela 9 – Composição química da mola de compressão em porcentagem de massa.

Amostra	C (%)	S (%)	N (%)	Al (%)	Si (%)	Ti (%)	V (%)	Cr (%)	Mn (%)	Cu (%)	Nb (%)	Mo (%)
Mola Helicoidal	0,71	0,003	0,0048	0,033	0,23	0,003	0,002	0,022	0,60	0,049	0,002	0,002

Fonte: ensaio de espectrometria. Produção do software WinOE, 2017.

Com estes valores, pode-se concluir que o material analisado é um aço com alto teor de carbono, com 0,71% em massa de carbono (C), além de apresentar consideráveis teores de silício (Si) (0,23% em massa) e Manganês (Mn) (0,60% em massa). Ao compararmos estes valores com a tabela 12 do fabricante Sandsteel(2013), pode-se concluir que o aço em questão é um aço SAE 1070 Temperado, uma vez que, segundo o próprio fabricante, a categoria de aços SAE 1070 possui os seguintes intervalos de concentração: C (0,65 a 0,80), Si (0,15 a 0,30) e Mn (0,60 a 0,70) possuindo índice de dureza Rockwell C, na faixa de 44 a 48 HRC e resistência a tração na faixa de 1400 a 1580 [N/mm²]. Ainda segundo Sandsteel(2013), o aço SAE 1070 é normalmente utilizado para aplicações onde o processo irá sofrer alto grau de conformação sendo sua principal característica a alta resistência mecânica, aliada a boa tenacidade. Este tipo de aço normalmente é utilizado como aço mola para confecções de peças ou molas pelas indústrias agrícolas, automobilística, mecânica, linha branca, instrumentos de corte, cutelaria, construção civil, ferramentas, entre outras.

4.3.2 Comparação

Com o material já definido, foi possível obter o valor do S_{ut} na literatura, estando o valor do S_{ut} para aço SAE 1070 Temperado na faixa de 1400 a 1580 MPa, sendo considerado para análise no presente trabalho o patamar inferior de 1400 MPa, uma vez que, ao se converter a Dureza Brinell média calculada (370 HB) com o uso da tabela 13, obtém-se um valor de 40 HRC, que está abaixo do patamar inferior de 44 à 48 HRC fornecidos pela tabela Sandsteel(2013).

Tabela 10 - Tabela de aços da fabricante Sandsteel(2013).

Produto	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P máx. (%)	S máx. (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Classe (Estado)	Dureza		Resistência a Tração (N/mm ²)
										HRB máx.	HRC	
SAE 1045/45	0,37 a 0,50	0,15 a 0,30	0,60 a 0,90	0,04	0,05	-	-	-	Sem Têmpera	80	-	490
SAE 1070/75	0,65 a 0,80	0,15 a 0,30	0,60 a 0,70	0,04	0,05	-	-	-	Sem Têmpera	90	-	610
SAE 1070/75	0,65 a 0,80	0,15 a 0,30	0,60 a 0,70	0,04	0,05	-	-	-	Temperado	-	44 a 48	1400 a 1580

Fonte: Sandsteel, 2013.

Tabela 11 - Tabela de conversão Brinell para Rockwell C.

Dureza Brinell		Dureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell			
(HB)	(HB)		(HRA)	(HRB)	(HRC)	(HRD)
429	429	455	73,4	-	45,7	59,7
415	415	440	72,8	-	44,5	58,8
401	401	425	72,0	-	43,1	57,8
388	388	410	71,4	-	41,8	56,8
375	375	396	70,6	-	40,4	55,7
363	363	383	70,0	-	39,1	54,6

Fonte: Mitsubishi Carbide, 2017.

Ao se comparar o S_{ut} obtido através da tabela dos fornecedores de aço (1400 MPa) com o experimental (1357,63 MPa) e o calculado (1221,17 MPa), tem-se uma diferença de 3,03% para o experimental e de 12,77% para o calculado. Esta diferença pode ser devido a alguns fatores, como:

- 1) A inexistência de um valor preciso fornecido pela tabela da fabricante Sandsteel (2013). A faixa de valores faz com que uma média seja necessária, para que a análise dos resultados seja realizada, entretanto, essa consideração contribui para uma imprecisão dos resultados, uma vez que é um valor aproximado;
- 2) Não se sabe a que tipo de tratamento térmico o aço da mola abordada neste trabalho foi submetida, isto contribui para uma fonte de incerteza no resultado uma vez que, para a obtenção do Sut extraído do site da fabricante, foi considerado o material como aço SAE 1070 temperado, visto que a literatura aponta que o aço 1070 normalmente é utilizado na forma temperada e revenida para fabricação de molas.
- 3) Imprecisões e incertezas nas conversões de Brinell para Rockwell, visto que os valores tabelados são aproximações e os mesmos já carregam a imprecisão da conversão de Vickers para Brinell.
- 4) As informações fornecidas pela fabricante Sandsteel (2013) são referentes à dureza e Sut de uma fita de aço 1070 temperado. Pode ser que para o fio de mola, o valor de Sut seja diferente.

Observação: Neste ensaio, desconsideraram-se erros de calibração do espectrômetro, pois o mesmo passa por uma rotina diária de calibração.

5 CONCLUSÕES

Com este trabalho, verificou-se a importância dos ensaios abordados para uma precisa caracterização do objeto de estudo. Tais ensaios podem ser aplicados a diversos setores da indústria, principalmente no que diz respeito à análise de falha e garantia da qualidade, podendo ser aplicados a uma elevada gama de materiais para as mais diversas aplicações.

Quanto aos ensaios em si, foi possível um aprofundamento prático e teórico dos mesmos, através da análise experimental realizada, que foi desde a obtenção dos corpos de prova, até a realização dos ensaios e posterior obtenção dos resultados. Entretanto, é desejável a realização dos ensaios em equipamentos que estejam segundo a sua respectiva norma regulamentadora, principalmente no que diz respeito à calibração, para que o ensaio em si não se torne uma fonte de incerteza.

Nos cálculos realizados, mesmo com diversas considerações, provou-se com o uso da teoria disponível no Norton (2013) que os resultados obtidos são aceitáveis. Tais valores permitiram uma comparação com os valores do método experimental, sendo ambos próximos entre si. Tal fato confere confiabilidade aos métodos utilizados, garantindo que os resultados são próximos da realidade.

O presente trabalho agregou muito conhecimento a respeito de análises estáticas e químicas, tanto do conhecimento teórico quanto prático, com suas normas e procedimentos. O autor deste trabalho, espera com isso contribuir que o mesmo inspire outros a se enveredar por este ramo, que vai muito além do escopo do presente estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇOSPORTE. **Aço SAE 1070**. São Paulo. Disponível em: <<http://www.acosporte.com.br/aco-sae-1070>>. Acesso em: 01 jul. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1806**: standard practice for sampling steel and iron for determination of chemical composition. Philadelphia, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384-16**: standard test method for microindentation hardness of materials. Philadelphia, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 415**: standard test method for analysis of carbon and low-alloy steel by spark atomic emission spectrometry. Philadelphia, 2016.

ARCANJO, Edgar P. **Caracterização do comportamento a fadiga de molas**. 2008. 45 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13283**: barras de aço, laminadas a quente, redondas, quadradas e sextavadas, para uso geral – dimensões. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13284**: preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica – procedimento. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIATED SPRING. BARNES GROUP INC. **Design handbook**: engineering guide to spring design. Bristol: Spring/Barnes, 2011. Disponível em: <http://www.delta-elkon.co.il/filestock/files/cats_2011/SPEC/122spec_design.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2017.

BREMENKAMP, Filipe A. Elementos de máquina: molas. Vitória, 2013. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/FilipeBremenkamp/molas-helicoidais>>. Acesso em: 17 ago. 2017.

CIMM. **Ensaio mecânicos**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6519#.WWJ_L4TyvIU>. Acesso em: 14 maio 2017.

WEEBLY. **Dureza Vickers**. Disponível em: <<http://dureza.weebly.com/escalas-de-dureza.html>>. Acesso em: 02 maio 2017.

EMCOTEST. **DuraScan**: micro hardner tester catalog. Atenas, 2009. Disponível em: <http://www.priniotakis.gr/catalog2/manuals/DuraScan_EN3023.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2017.

FILHO, Jose H. D. **Molas**: funcionamento, propriedades e utilidades. Montes Claros, 2011. Disponível em: <<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=31537>>. Acesso em: 11 jul. 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6507**: metallic materials – Vickers hardness test. Geneva, 2005.

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

ROHDE, Regis A. **Metalografia**: preparação de amostras. Disponível em: <<http://www.urisan.tc.br/~lemm/metalografia.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2016.

SANDSTEEL. **Fitas de aço carbono**. Campinas/SP. Disponível em: <<http://www.sandsteelcampinas.com.br/fitas-de-aco-carbono/sae-1070-sem-tempera.asp>>. Acesso em: 01 jul. 2017.

SERVIMOLAS. **Molas helicoidais de compressão**. Disponível em: <<http://www.servimolas.pt/mol-as-helicoidais/compressao>> Acesso em: 31 maio 2017

SHIMADZU. 2017. **AG-X Plus**. Barueri/SP. Disponível em: <<http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/test/estaticas/servo-eletricas/ag-x.shtml>>. Acesso em: 15 maio 2017.

STOCKMOLAS. **Molas**: história e definição. São Paulo/SP. Disponível em: <<http://www.stockmolas.com.br/mola-historia-definicao>>. Acesso em: 29 abr. 2017.

THERMOFISHER. **ARL™ 3460**: Optical emission spectrometer. Disponível em: <<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/iqlaahgabdfaaemabj>>. Acesso em: 30 jun. 2017.