

FELIPE ENDO ARRUDA NITSCHKE

LEI DE HOOKE E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA: UMA PROPOSTA EXPERIMENTAL APLICADA AO PRIMEIRO ANO DO ENSINO MÉDIO

MARINGÁ - PR
agosto, 2019

LEI DE HOOKE E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA: UMA PROPOSTA EXPERIMENTAL APLICADA AO PRIMEIRO ANO DO ENSINO MÉDIO

FELIPE ENDO ARRUDA NITSCHKE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), polo UEM, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo Garcia
Fernandes

MARINGÁ - PR
agosto, 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

N732L Nitsche, Felipe Endo Arruda
Lei de Hooke e conservação de energia: uma proposta experimental aplicada ao primeiro ano do ensino médio / Felipe Endo Arruda Nitsche. -- Maringá, 2019.
xxvii, 267 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo Garcia Fernandes.
Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Física, Programa de Pós-Graduação em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, 2019.

1. Lei de Hooke. 2. Conservação de energia. 3. Aprendizagem significativa. I. Fernandes, Paulo Ricardo Garcia, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Exatas. Departamento de Física. Programa de Pós-Graduação em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. III. Título.

CDD 21.ed.507

Elaine Cristina Soares Lira - CRB-9/1202

**LEI DE HOOKE E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA: UMA PROPOSTA
EXPERIMENTAL APLICADA AO PRIMEIRO ANO DO ENSINO MÉDIO**

FELIPE ENDO ARRUDA NITSCHÉ

Orientador
Prof. Dr. Paulo Ricardo Garcia Fernandes

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Prof. Dr. Paulo Ricardo Garcia Fernandes (DFI/UEM)

Prof. Dr. Michel Corci Batista (UTFPR/Campo Mourão)

Profa. Dra. Hatsumi Mukai (DFI/UEM)

Maringá-PR
agosto, 2019

“A Física é a poesia da Natureza. A Matemática, o idioma”.

Antonio G. Lacerda

Dedico esta dissertação aos meus pais, irmãos, avó, amigos e a todos que participaram direta ou indiretamente para a realização da mesma.

Agradecimentos

- A Deus por me permitir saúde, paz de espírito e força durante toda a minha vida e a Nossa Senhora Aparecida por estar sempre de braços abertos a me atender em minhas angústias.

- Ao Professor Paulo Ricardo Garcia Fernandes por ter-me orientado na realização deste trabalho e pelo exemplo de profissional e pessoa que é para todos. Seus ensinamentos ajudaram-me não só na realização deste trabalho, mas me forneceu uma nova visão da Física e de todo o universo.

- À Professora Hatsumi Mukai a quem tenho muito apreço e estima; seus ensinamentos foram valiosos para a realização deste trabalho. Obrigado por toda a sua dedicação e paciência para comigo. É um grande exemplo a ser seguido.

- Aos Professores Breno Ferraz de Oliveira, Maurício Antonio Custódio de Melo, Ronaldo Celso Viscovini, Hercília Alves Pereira de Carvalho, Shalimar Calegari Zanatta, Luciano Gonsalves Costa e José Roberto Dias Pereira pelos valiosos ensinamentos durante suas aulas; vocês foram decisivos, dinâmicos e dedicados ao ministrarem suas aulas.

- Aos meus colegas do MNPEF-UEM em especial: Arlete, Pedro Paulo, Rodrigo, Ana Paula, Bruna, Marcos, Pedro Rogério, Cleuza, Donizete e demais, pelos momentos de trocas mútuas que foram muito válidas, bem como, a amizade que construímos durante nossa caminhada.

- Aos meus pais, Vagne e Adriana, por ser meu alicerce e por sempre me apoiarem. Sem vocês nada disso seria possível! Obrigado por tudo!

- Aos meus irmãos Lucas e Junior que rezaram e torceram por mim.

- À minha vó Leonidia que sempre me apoiou e me ajudou em tudo o que estive em seu alcance.

- Ao apoio de toda minha família.

- A equipe diretiva do Colégio Estadual Antonio Tortato – EMN, por meio de sua diretora Prof^a. Elizângela Sabater Moreira, a quem tenho apreço e estima por permitir a aplicação da minha proposta (PE) e sempre me ajudar no que precisei.

- À minha querida amiga Eliani Caparroz a quem devo muito. Não há dinheiro no mundo que possa retribuir o que fez por mim. Obrigado por tudo!

- Ao meu amigo Guilherme Bertolin pelas mútuas descobertas, alegrias e amizade construídas além dos momentos de descontração que vivenciamos.
- À minha amiga Elisandra que me ajudou em minha caminhada no decorrer deste trabalho e por sempre me mostrar seu amor pela educação de qualidade.
- À Dona Lourdes e Sr. Antonio Caparroz por todos os préstimos ao qual me receberam e me trataram. Levarei vossos ensinamentos em meu coração.
- Aos amigos que fiz no Colégio Estadual Antonio Tortato de Paranacity por me ajudarem e por me incentivarem a dar esse importante passo em minha vida. Agradeço aos amigos Cristina Xavier, Rosemeire Moron, Luciana Moron, Sabrina França, João Edson, Marlúcia Santiago, Wanda Cocco, Douglas Robasckievzk, Janaína Minjon, Elisângela Freitas, Elaine Rogério.
- A todos que colaboraram para o acontecimento deste momento, que torceram por mim e que me incentivaram até aqui.
- O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

LEI DE HOOKE E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA: UMA PROPOSTA EXPERIMENTAL APLICADA AO PRIMEIRO ANO DO ENSINO MÉDIO

Felipe Endo Arruda Nitsche

Orientador

Prof. Dr. Paulo Ricardo Garcia Fernandes

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

No Ensino Médio, temos a percepção de que a lei de Hooke e a conservação da energia mecânica, quando abordadas na componente curricular de Física, ainda são temas pouco explorados e/ou com mínima compreensão dos estudantes. A inexistência de estratégias didáticas estimuladoras e a falta de recursos materiais para as atividades práticas nas escolas são apontadas como alguns dos principais fatores que acentuam o desconhecimento e a incompreensão dos alunos a respeito da lei de Hooke e da conservação da energia mecânica. Um dos objetivos deste trabalho de mestrado foi instigar os estudantes a respeito desse princípio de conservação a partir de experimentos que foram realizados utilizando os *kits* de laboratório de Física disponibilizados pelo Ministério da Educação às escolas públicas do estado do Paraná. A sequência didática contém atividades experimentais com cinco experimentos envolvendo o sistema massa-mola e a conservação de energia mecânica utilizando materiais já existentes na escola. Os resultados experimentais foram analisados por meio da perspectiva da Teoria de D. Ausubel relacionada a uma aprendizagem significativa. A sequência didática foi aplicada aos alunos da Primeira Série do Ensino Médio na qual realizaram medidas estáticas e dinâmicas com molas buscando, inicialmente, a determinação da constante elástica das mesmas a partir de análises gráficas. Posteriormente, se buscou a correlação dos resultados experimentais com o conceito de conservação de energia mecânica. Como resultados, pode-se constatar que os estudantes conseguem assimilar os conceitos físicos abordados com maior facilidade quando estes são desenvolvidos

de forma prática com uso de materiais simples e presentes no cotidiano, tais como, as molas helicoidais. Em contrapartida é perceptível a grande dificuldade dos alunos com a manipulação de gráficos e a interpretação física dos parâmetros envolvidos. Percebemos, portanto, a urgente e necessária atuação interdisciplinar entre a Física e a Matemática, colocando a leitura, interpretação de gráficos, manipulação de escalas e uso de funções matemáticas em resultados experimentais de atividades práticas de Física como principais desafios a serem superados.

Palavras chave: Lei de Hooke, Conservação de energia, Aprendizagem significativa.

ABSTRACT

HOOKE'S LAW AND ENERGY CONSERVATION: AN EXPERIMENTAL PROPOSAL APPLIED TO THE FIRST YEAR OF HIGH SCHOOL

Felipe Endo Arruda Nitsche

Supervisor:

Prof. Dr. Paulo Ricardo Garcia Fernandes

A Master dissertation submitted to the graduate studies Program of Professional Education of Physics (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF), as a part of the basic requirements needed to achieve the title of Master on Physics Education.

In high school, the perception of the Hooke's law and the conservation of mechanical energy, when approached on the curricular component of physics, are still less explored themes and/or with minimal comprehension by the students. The nonexistent stimulating didactic strategies and the lack of material resources for the practical activities on the schools are some of the mentioned factors that stress the ignorance and the lack of comprehension of the students on the Hooke's law of conservation of mechanical energy. One of the objectives of this Master's degree work was to instigate students on the matter of these principles of conservation carrying out experiments using the physics lab kits that were available on the public schools of Paraná, given by the ministry of education. The didactic sequence includes experimental activities with five experiments, involving spring – mass system and the conservation of mechanical energy using already existent materials at schools. The experimental results were analyzed thru the perspective of the D. Ausubel's theory, related a meaningful learning. The Didactic sequence was applied on the first year of high school, in which they take static and dynamic measurements with coils, searching initially to establish the elastic constant from graph analysis. After that, search the correlation of the experimental results with the concept of mechanical energy conservation. As a result, we can perceive that the students achieve an easy assimilation of the physics concepts, when they have developed in a practical way using simple materials of the everyday life, such as coil springs. On the other hand, is clear the students' struggle on manipulating the graphs and interpreting the physical parameters involved. We see, however, the urgent and

necessary cross-disciplinary interaction between Physics and Mathematics, presenting as a focus mater the Reading, graph interpretation, scale manipulation and the use of mathematical functions on the results of experiments of practical activities on the Physics discipline as main challenges to overcome.

Keywords: Hooke's law, Conservation of energy, Meaningful learning.

Sumário

Resumo	ix
Abstract	xi
Lista de Figuras	xvi
Lista de Tabelas e Quadros	xxiv
Lista de Abreviaturas	xxvii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - ASPECTOS FÍSICOS E DE APRENDIZAGEM	4
1.1. Aspectos Históricos da Lei de Hooke	5
1.2. Biografia Resumida de Robert Hooke	6
1.3. Lei de Hooke	8
1.4. Explorando a Lei de Hooke	10
1.4.1 Associação de molas helicoidais e determinação da constante elástica k da mola	11
1.4.1.1. Associação de molas em série.....	11
1.4.1.2. Associação de molas em paralelo.....	13
1.4.2 Determinação da constante elástica k da mola para os métodos: estático e dinâmico – via segunda Lei de Newton	15
1.4.2.1 Determinação da constante elástica k da mola - Método Estático	15
1.4.2.2 Determinação da constante elástica k - Método Dinâmico	17
1.5 Constante Elástica Via Lei de Conservação de Energia Mecânica.....	20
1.5.1 Trabalho realizado pela força elástica	21
1.5.2 Forças Conservativas.....	25
1.5.3 Forças de atrito, uma força conservativa.....	29
1.5.4 Energia Mecânica.....	31

1.5.4.1 Energia Cinética (E_c)	33
1.5.4.2 Energia Potencial (E_p)	34
1.5.5 Conservação de Energia Mecânica	37
1.5.6 Aplicações da Lei de Conservação de Energia Mecânica	40
1.5.6.1 Constante Elástica – Método Estático	41
1.5.6.2 Constante Elástica – Método Dinâmico	43
1.5.6.3 Armazenamento de Energia Potencial – A lata “mágica”	46
1.6 Teoria de Aprendizagem e Sequência Didática	47
1.6.1. A aprendizagem significativa de D. Ausubel	47
1.6.2. Sequência Didática (SD)	50
CAPÍTULO 2 – PRODUTO EDUCACIONAL E METODOLOGIA	52
2.1. Sequência Didática	52
2.1.1 <i>Kit</i> Experimental - MEC	53
2.2. Aplicação do Produto Educacional	56
2.2.1 Aspectos técnicos da SD e sua aplicação	56
2.3. Questionários sobre as concepções prévias (QPr)	61
2.4. Relação dos experimentos utilizados na SD	63
2.5. Questionários Avaliativos (QPo)	78
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES.....	103
3.1. Etapa 01 – Lei de Hooke – Método Estático	103
3.1.1 Análise das respostas do Questionário 01 – Concepções prévias (QPr1)	86
3.1.2 Exp. 01 - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal no método estático e Análise do QPo2.....	92
3.2 Etapa 02: Lei de Hooke – Método Dinâmico.	103
3.2.1 Análise das respostas do Questionário 02: Concepções prévias (QPr2)	103

3.2.2 Experimento 02 - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal – método dinâmico – E, questionário avaliativo QPo2.	108
3.3 Etapa 03 – Lei de Hooke – Associação de Molas: Série e Paralelo.....	113
3.3.1 Análise das respostas do Questionário 03 (QPr3): Concepções Prévias sobre a Lei de Hooke – Associação de molas.	113
3.3.2 Determinação da constante elástica de uma mola utilizando a associação de molas em série e em paralelo e QPo3: análise e discussão dos resultados.	115
3.4 Etapa 04 - Conservação de Energia Mecânica - O curioso caso da “lata energética”	119
3.4.1. Análise das concepções prévias (QPr4)	119
3.4.2. Análise do resultado do Experimento 04 - Conservação de Energia Mecânica– O curioso caso da “lata energética” e do QPo4	121
CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
Referências	131
ANEXO A - Termo de Autorização da Escola	134
ANEXO B - Declaração de Revisão Ortográfica.....	135
APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL	136

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Imagem de uma Foto de Robert Hooke: cientista britânico que contribuiu enormemente em várias áreas da ciência. FONTE: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/biologia/robert-hooke.htm>.

Figura 1.2 - Desenho esquemático representando de forma unidimensional a força exercida pela mola, \vec{F}_m , quando esta é: (a) distendida e (b) comprimida, de uma quantidade Δy , por meio de uma força externa, \vec{F}_{ext} . Sendo $y = 0$ a mola em seu comprimento relaxado (estado natural). E, no canto direito o sistema de coordenadas cartesiano, indicando a direção e sentido adotado neste trabalho. FONTE: o autor.

Figura 1.3 - Ilustração de duas molas de constantes k_1 e k_2 , associadas em série: (a) sem massa suspensa na extremidade livre da associação; (b) sistema em equilíbrio estático com uma massa na extremidade livre da mola; (c) \vec{F}_{ext} = força externa; \vec{P} = força peso; \vec{F}_{el} = força elástica; \vec{F}_s = força da série; k_s = constante elástica equivalente da associação em série; y_1 e y_2 são as elongações das respectivas molas. O sistema de referência está indicado no canto superior esquerdo da figura. As massas das molas são desprezíveis em relação à massa suspensa. FONTE: o autor.

Figura 1.4 - Figura esquemática indicando: (a) uma associação de duas molas em paralelo com constantes elásticas k_1 e k_2 ; (b) \vec{F}_{ext} é a força externa aplicada às molas em paralelo, dada por \vec{P} a força peso; k_p a constante elástica equivalente das molas associadas em paralelo; \vec{F}_{el_1} e \vec{F}_{el_2} são as forças elásticas em cada uma das molas; (c) o sistema equivalente da associação em paralelo. As massas das molas e da haste rígida são desprezíveis em relação à massa suspensa. FONTE: o autor.

Figura 1.5 - Esboço de um gráfico representando o comportamento linear do módulo da Força ($F = P = mg$) versus módulo do deslocamento (Δy), para 3 molas com características diferentes: comprimento ou material; O coeficiente angular da reta $F_i = F_0 + k_i \Delta y$, sendo $i = 1, 2, 3$, é a constante elástica da respectiva mola e o coeficiente linear, F_0 , dessa reta é a força peso inicial que atua na mola, inclusive sua massa caso não seja desprezível. FONTE: o autor.

Figura 1.6 - Figura esquemática indicando um sistema massa-mola oscilando em torno do ponto de equilíbrio ($y = 0$). A mola possui constante k , a força externa (no caso a força peso \vec{P} do corpo de massa m) atua alongando de uma quantidade y e retorna comprimindo em direção oposta até $-y$. FONTE: figura adaptada da referência. [Hall 11].

Figura 1.7 - Representação esquemática da força exercida pela mola em função da sua distensão. Nota-se que o trabalho realizado por essa força é representado pela área pintada na figura. FONTE: figura adaptada da referência Nussenzweig (2002).

Figura 1.8 - Desenho esquemático ilustrando uma massa m que sai do ponto inicial i até um final f , e várias das trajetórias que o mesmo possa percorrer. FONTE: figura adaptada da referência [Tor13].

Figura 1.9 -- Figuras esquemáticas (a) sistema massa mola e (b) pêndulo simples. Em ambos os casos oscilam em relação ao seu ponto de equilíbrio ($y=0$ e $h=0$), de ($y = \pm d$ e $y = \pm A$) respectivamente para cada caso. No caso (a) por meio de duas forças: força peso (\vec{P}) do bloco de massa m e da força elástica/força da mola ($\vec{F}_{el} = \vec{F}_m$) e em (b) somente pela atuação da componente tangencial (\vec{P}_{tg}) da força peso da esfera de massa m , após esta ser liberada de uma altura h . FONTE: o autor.

Figura 1.10 - Figura esquemática indicando as etapas de um ciclo completo, do processo de ida e volta da oscilação do sistema massa-mola: (1) atuação de uma força externa (\vec{F}_{ext}) com oposição da força da mola (\vec{F}_m); (2) retira-se a força externa (\vec{F}_{ext}); (3) a mola se desloca para baixo pela atuação da força peso (\vec{P}) e da força da mola (\vec{F}_m), (4) atinge a posição $+d$ (amplitude máxima) e inicia seu processo de retorno (5) em que a força da mola e o deslocamento mudam de sentido, passa pelo ponto de equilíbrio, até atingir (6) a posição inicial ($y = -d$), completando 1 período (T). FONTE: figura adaptada da referência [Hall11].

Figura 1.11 - Representação das forças que atuam sobre um bloco ao entrar em movimento pela ação de uma força \vec{F} e atuação da força de atrito \vec{f}_a no caso cinético (superfície não lisa), (a) para ir de A até B e em (b) para retornar de B até A. As demais forças são: \vec{N} a força normal e \vec{P} a força peso estão em equilíbrio. Indicado ainda a velocidade (\vec{v}) do bloco e seu sentido de movimento. FONTE: o autor.

Figura 1.12 - Figura ilustrativa indicando o referencial, utilizando o sistema cartesiano – plano (x,y) , de liberação de um corpo de massa m , de uma altura h , sendo a única força atuando durante o movimento ser a força peso (\vec{P}). FONTE: o autor.

Figura 1.13 - Figura esquemática de um sistema massa-mola para a obtenção da constante elástica para o método estático. As forças que atuam no sistema provocando um deslocamento Δy , são a força elástica $\vec{F}_{el,i}$ e a força peso \vec{P} , em equilíbrio estático. Os índices i e f que acompanham as representações de energia cinética e potencial simbolizam os estados inicial e final, respectivamente. FONTE: o autor.

Figura 1.14 - Figura esquemática de um sistema massa-mola para obtenção da constante elástica do caso dinâmico via lei de conservação da energia mecânica. As forças que atuam no sistema provocando um deslocamento $y_1 + y_2$ são: a força elástica (\vec{F}_{el}) e a força peso \vec{P} , em torno de um novo ponto de equilíbrio (f). FONTE: o autor.

Figura 1.15 - Desenho esquemático ilustrando a ação das forças elásticas \vec{F}_{el} e forças equivalentes \vec{F} em sistemas massa-molas. Em (a), pode-se observar a esquematização de duas molas associadas em paralelo e em (b) duas molas associadas em série. Em ambos os casos, as molas oscilam com o mesmo período T e nestes casos obtemos a constante elástica k equivalente. FONTE: o autor.

Figura 1.16 - Desenho esquemático mostrando o movimento da “lata” de sair de um ponto e retornar ao mesmo ponto, somente pela atuação de uma força externa dando um impulso na lata. Por um sistema interno não visível, que funciona como um motor movido a “corda”. FONTE: o autor.

Figura 1.17 – Imagem fotográfica de David Paul Ausubel (1918-2008). Psicólogo Educacional estadunidense. FONTE: <<https://novaescola.org.br/conteudo/262/david-ausubel-e-a-aprendizagem-significativa>>.

Figura 2.1 - Imagem fotográfica do kit experimental de mecânica, doado pelo MEC, utilizado na aplicação da SD. FONTE: o autor.

Figura 2.2 - Imagem fotográfica dos materiais incluídos no kit disponibilizado pelo MEC. (a) paquímetro e cronômetros b) em destaque as massas com a gramatura gravada, que se encontram apresentadas em (c) e em (d); (c) base lateral para massas circulada em vermelho; (d) circulados em azul: suporte universal com o suporte lateral (arredondado) e régua, (e) em detalhes proposto pelo autor, um suporte para massas opcional ao de madeira (c). FONTE: o autor.

Figura 2.3 - Desenho esquemático indicando o momento em que será aplicado o QPr no contexto da SD. FONTE: o autor

Figura 2.4 - Desenho esquemático indicando o momento em que será aplicado cada experimento no contexto da SD. FONTE: o autor

Figura 2.5 - (a) Foto da montagem inicial para determinação da constante elástica da mola. Em que: (1) Base da haste; (2) Haste do suporte; (3) suporte lateral; (4) mola helicoidal; (5) régua. Em destaque (b) a indicação da posição do comprimento inicial da mola A, $L_0 = 0,00$ cm. FONTE: o autor.

Figura 2.6 - Desenhos ilustrativos de como utilizar o fio de algodão ou de nylon como um suporte para massas: (a) uma única massa e em (b) visão frontal de mais de uma massa (no caso duas massas). Fonte: o autor.

Figura 2.7 – Imagem fotográfica da montagem experimental, para duas molas associadas em série. Em (a (1)) o suporte universal apoiada na extremidade de uma mesa e fixada por meio de livros apoiados sobre a base da mesma, desconsiderar a

régua apoiada no suporte; (a(2)) suporte lateral (no caso, uma argola metálica) a qual uma das extremidades do sistema fica pendurado; (a(3)) massa m aferida suspensa na mola. E, em (b) indicando a última espiral da mola na posição 0,0 cm da régua de madeira (utilizada por ser mais longa em relação à de metal). FONTE: o autor.

Figura 2.8 - Imagem fotográfica de duas molas associadas em paralelo no Exp. 03. (a) com o suporte de madeira do kit da instituição, em destaque, e em (b) o mesmo sistema, mas utilizando um suporte lateral em barra (fixar a extremidade da mola com fita adesiva) e o suporte de massas confeccionado pelo autor (Figura 2.2 (e)). FONTE: o autor.

Figura 2.9 - Desenho ilustrativo da montagem da “lata energética”. FONTE: o autor.

Figura 2.10 - Desenho esquemático indicado o momento em que será aplicado o QPo no contexto da SD. Fonte: o autor

Figura 2.11 - Gráfico da força ($F=P$) em dinas (dyn) versus a variação de distensão da mola (ΔL) medida em centímetros (cm). FONTE: o autor.

Figura 2.12 - Gráfico da força peso ($F=P$) em dinas (dyn) da associação de duas molas iguais em série versus o deslocamento (ΔL) cm. FONTE: o autor.

Figura 2.13 - Gráfico da força peso ($F=P$) em dinas (dyn) da associação de duas molas iguais em paralelo versus o deslocamento (ΔL) cm. FONTE: o autor.

Figura 2.14 - Gráfico da força peso ($F=P$) em dinas (dyn) versus o deslocamento (ΔL) cm da parte estática para uma mola (mola 1), e as configurações em série e em paralelo para duas molas iguais a mola 1. Confeccionado com os dados da Tabela 2.1, 2.3 e 2.4. FONTE: o autor.

Figura 3.1 - Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 09 à questão 01 - QPr1. Transcrição da resposta: “A elasticidade define-se como sendo a propriedade que certos materiais apresentam de serem capazes de recuperar a sua forma e estado inicial”. FONTE: estudante 09 e arquivo do autor.

Figura 3.2 - Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 15 à questão 01 – QPr1. Transcrição da resposta: “Eu entendo que e [SIC] tudo que pode esticar elastico [SIC] ou uma cauça [SIC] que você puxa e ela solta”. FONTE: estudante 15, e arquivo do Autor.

Figura 3.3 - Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 29 à pergunta 01 - QPr1. Transcrição: “Uma coisa que estica e volta, desaparece com a retirada das forças que a originaram.” FONTE: estudante 29, e arquivo do Autor.

Figura 3.4 – Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 10 à pergunta 01 – QPr1. Transcrição da resposta: “Materiais que quando sofrem deformação por uma força, se retirado o material vouta [SIC] ao seu formato original”. FONTE: estudante 10 e arquivo do Autor.

Figura 3.5 – Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 10 à questão 01 – QPr1. Transcrição da resposta: “forças que são exercidas por sistema elástico quando sofrem deformação”. FONTE: estudante 22 e arquivo do autor.

Figura 3.6 - Gráfico do número de alunos pela análise das respostas dos estudantes à questão 06 do questionário QPr1. FONTE: o autor.

Figura 3.7 - Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 12 acerca da questão 06 (QPr1). Transcrição: “Quando apertamos a mola e soltamos ela vai volta normal isso é conservação e liberação de energia”. FONTE: estudante 12 e arquivo do autor.

Figura 3.8 - Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 11 acerca da questão 06 (QPr1). Transcrição: “Ex.: Quando aplicamos uma força a uma mola, deformando há uma conservação de energia, quando paramos de aplicar essa força, a energia é liberada fazendo com que a mola volte em seu estado original”. FONTE: o autor e estudante 11.

Figura 3.9 - Imagem fotográfica do laboratório de Ciências (Física, Química e Biologia) do Colégio Estadual Antonio Tortato (CEAT). FONTE: acervo – CEAT

Figura 3.10 - Imagem fotográfica registrado do grupo de estudantes realizando o Exp. 01. FONTE: arquivo do autor.

Figura 3.11 - Gráfico da magnitude da Força $F = P(\text{dyn})$ em função do deslocamento $\Delta L(\text{cm})$, confeccionado com os dados da Tabela 2.7 (após ser preenchida pelo grupo), confeccionado com o auxílio do Microsoft Excel 2010. Os símbolos quadrados representam os dados experimentais e a reta em verde a reta ajustada, $F = P = 6533 \Delta L + 15353$, pelo método dos mínimos quadrados. FONTE: o autor e grupo A.

Figura 3.12 - Gráfico da força, $F = P(\text{dyn})$, em função do deslocamento, $\Delta L(\text{cm})$, a partir dos dados da Tabela 2.7 (após ser preenchida pelo grupo), confeccionado manualmente pelos alunos integrantes do Grupo A. Os símbolos quadrados representam os dados experimentais e a reta a reta ajustada pelo método dos mínimos quadrados. FONTE: autor e grupo A.

Figura 3.13 - Registro dos estudantes confeccionando gráficos utilizando o programa do Microsoft Excel 2010® no laboratório de informática do CEAT. FONTE: o autor.

Figura 3.14 - Gráfico do módulo da força peso $P(\text{dyn})$ em função do deslocamento $\Delta L(\text{cm})$. O gráfico apresentado pelo Grupo B apresenta um bom ajuste, $R^2 = 0,99 \cong 1$, conforme pode ser verificado nos quadrados em verde em relação da reta de ajuste: $F = P = 5360 \Delta L + 23386$. FONTE: o autor e Grupo B.

Figura 3.15 - Gráfico do módulo da força peso $F=P$ (dyn) em função do deslocamento ΔL (cm). Pode-se notar que o valor de R^2 obtido pelo grupo C não iguala-se, e nem é próximo de 1, apresentando a discrepância entre os pontos em verde (Série1) que são os dados experimentais, ao da reta de ajuste. FONTE: o autor e grupo C.

Figura 3.16 – Imagem fotográfica do registro da Concepção do estudante 04 (integrante do Grupo C) sobre o fato de não obterem um gráfico satisfatório. Transcrição: “Nem todos os pontos não obedece [sic] a Lei de Hooke -> A lei de Hooke é aplicada pra [sic] todo tipo de mola, mais [sic] nem toda situação. A mola é um objeto deformável [sic] se você fizer [sic] que ela atinge [sic] a sua elasticidade máxima ela fica deformável, não volta a sua elasticidade do início, nesse caso a Lei de Hooke não é válida Força restauradora em corpos de acordo com uma constante elástica.” FONTE: estudante 04 (Grupo C) e arquivo do autor.

Figura 3.17 - Gráfico da quantidade de alunos versus os tipos de respostas dadas pelos estudantes. Os estudantes participantes responderam a questão 1 do QPr2: “Você acha que seria possível determinar a constante elástica de uma mola usando-se movimentos oscilatórios?”. FONTE: o autor.

Figura 3.18 - Imagem fotográfica da resposta prévia ao Exp. 01, QPr2, do estudante 13 para a questão 03. Transcrição: “O movimento oscilatório é aquele que ocorre indo e vindo de um lugar para outro. No caso da mola seria um movimento de baixo pra [sic] cima.” FONTE: estudante 13 e arquivo do autor.

Figura 3.19 - Imagem fotográfica da resposta prévia ao Exp. 01, QPr2, do estudante 21 para a questão 03. Transcrição: “É um movimento de subir e descer, como acontece se a gente estica uma mola e solta. Vamos observar que a mola faz um movimento de vai e volta até que para [sic]”. FONTE: estudante 21 e arquivo do autor.

Figura 3.20 - Gráfico do Número de estudantes versus principais concepções. O gráfico apresenta as principais respostas dos estudantes com relação à questão 04, quando questionados se achariam possível determinar a constante elástica de uma mola utilizando outro método diferente do estático. FONTE: o autor.

Figura 3.21 - Imagem fotográfica da resposta do estudante 06 para a pergunta 05 do QPr2. FONTE: estudante 06 e arquivo do autor.

Figura 3.22 - Imagem fotográfica das molas nos suportes metálicos utilizadas pelos grupos de alunos no Exp. 01, e identificados para uso no Exp. 02. FONTE: o autor.

Figura 3.23 – Imagem fotográfica do grupo de estudantes realizando o Exp. 02 da SD. FONTE: o autor.

Figura 3.24 - Imagem fotográfica da resposta indicando a concepção prévia do estudante 13 sobre associação de molas. Transcrição: “É como num colchão de molas. As molas estão colocadas lado a lado de forma a receber igualmente uma

força e poder suportar. Tênis também possuem molas (mais de uma) para suportar melhor os impactos.” FONTE: questionário respondido pelo aluno 13, e arquivo do autor.

Figura 3.25 - Gráfico do número de alunos versus o tipo de respostas sobre as concepções prévias dos estudantes sobre a possibilidade de usar mais de uma mola para um procedimento experimental. FONTE: o autor.

Figura 3.26 - Imagem fotográfica de respostas da questão Relate as principais dificuldades encontradas na realização do experimento. Relate também as suas considerações favoráveis em relação ao experimento (Item “g” do QPo3) dos estudantes 15 e 23, respectivamente, após a realização do Exp. 03. Transcrição das respostas: (a) Aluno 15 - “Nosso grupo determinou na prática a constante elástica da associação em série e em paralelo das molas. Ficou mais claro o que é oscilação e como os períodos variam a partir de quando associamos as molas em série e em paralelo”. (b) Aluno 23 - “Eu entendi que quando associa molas em série a constante elástica é inversa a das duas molas. Quando associamos em paralelo esta será somada. Isso foi possível a partir de movimentos oscilatórios e da realização do experimento”. FONTE: questionário respondido pelos alunos 15 e 23 e arquivo do autor.

Figura 3.27 - Foto do registro da resposta do aluno 12 após a realização do Exp. 03. Transcrição da resposta: “Calculamos a constante da mola por dois métodos: estático e dinâmico. Agora associamos molas em série e em paralelo de modo a determinar a constante elástica dessas associações. Entendi que por meio das associações podemos determinar diferentes períodos de oscilação além de entender como isso funciona. Quando as molas estão associadas em série, há uma energia que é dividida para a constante. Quando associamos em paralelo a energia é somada. FONTE: questionário do estudante 12 e arquivo do autor.

Figura 3.28 - Imagem fotográfica das respostas dos estudantes 12 e 08 acerca da pergunta 2 do QPr4: “Qual a relação entre uma mola helicoidal com um elástico?”. Transcrição das respostas: (a) Aluno 12 - “Ambos possuem elasticidade. Na mola há espiras e o elástico é um material deformável contínuo. Assim como há diferentes tipos de mola também encontramos diferentes tipos de elásticos. Se a mola é deformável e calculamos um valor de k , creio que é possível realizar a mesma coisa com elásticos”. (b) Aluno 08 - “São materiais que embora pareçam diferentes tem muita semelhança. Ambos são deformáveis, ou seja, podem ser esticados e comprimidos quando aplicamos força sobre eles. É possível que ambos os materiais sejam parte da Lei de Hooke: $F = K\Delta x$ ”. FONTE: questionário dos estudantes 12 e 08 e arquivo do autor.

Figura 3.29 - Imagem fotográfica dos estudantes organizados em grupos para desenvolvimento do Exp. 04: Construção da “lata energética”. FONTE: o autor.

Figura 3.30 - Imagem fotográfica das montagens experimentais do sistema de armazenamento de energia de um dos grupos. Em (a) podemos observar no frasco transparente, os elementos do qual esses sistemas são constituídos: (1) pote de maionese de plástico com tampa, (2) parafuso, (3) elástico e (4) palitos de madeira,

usados para fixar o elástico na extremidade da tampa e outro no fundo do frasco. Os demais frascos não transparentes, todos com tampas são: (5) lata, (6) lata de achocolatado, (7) pote de plástico de achocolatado, (8) recipiente de alumínio. FONTE: arquivos do autor e grupos A, B, C, D e E.

Figura 3.31 - Gráfico apresentando a quantidade de vezes que foi mencionada os tipos de energia pelos estudantes, presentes no sistema "lata energética" nas duas situações de movimento: na horizontal e em um plano inclinado, ao responderem ao QP04. Ressalta-se que os alunos mencionaram mais de um tipo de energia. FONTE: questionários dos estudantes e arquivo do autor.

Figura 3.32 - Imagem fotográfica da "Lata energética" montada com a substituição do elástico pela mola helicoidal, e os palitos de fósforo pelos pregos. FONTE: estudantes e arquivo do autor.

Figura 3.33 – Imagem fotográfica do registro na íntegra da estudante 24, sobre a relação do experimento com um objeto do cotidiano. FONTE: aluna 24 e arquivo do autor.

Lista de Tabelas e Quadros

Tabela 2.1 - Dados para determinação da constante elástica da mola : massa (g) são os valores das massas individuais a ser colocada no suporte para pendurar na mola; m_T (g) é a massa total formada pelas massas individuais mais seu suporte; P a sua força peso , ΔL (cm) o deslocamento causado para cada conjunto de massas suspensas na mola e k $\left(\frac{\text{dinas}}{\text{cm}}\right)$ a constante elástica da mola a ser determinada. As massas escolhidas são sugestões. FONTE: o autor.

Tabela 2.2 - Tempos medidos para três oscilações completas, repetindo-se dez vezes o processo. FONTE: o autor.

Tabela 2.3 - Dados (a) parte estática do deslocamento para cada conjunto de massas suspensas e (b) parte dinâmica: tempo total (t) em segundos, de 3 períodos de oscilações determinados na associação em série de duas molas helicoidais. Em que a massa é uma massa m suspensa de valor fixo em gramas, Período médio do tempo de 3 oscilações e a média das 5 repetições. FONTE: o autor.

Tabela 2.4 – Períodos de oscilações determinados na associação em paralelo de duas molas helicoidais. Dados (a) parte estática do deslocamento para cada conjunto de massas suspensas e (b) parte dinâmica: tempo total (t) em segundos, de 3 períodos de oscilações determinados na associação em série de duas molas helicoidais. Em que a massa é uma massa m suspensa de valor fixo em gramas, Período médio do tempo de 3 oscilações e a média das 5 repetições. FONTE: o autor.

Tabela 2.5 – Dados da parte estática dos experimentos 1, 2 e 3. FONTE: o autor.

Tabela 2.6 - Dados da constante elástica para o caso dinâmico referentes as Tabelas: 2.2, 2.3 e 2.4, obtidos da realização dos Experimentos 02 e 03 para uma mola, duas molas iguais em série e as mesmas molas em paralelo. A constante elástica da mola de 15,0 cm e 1,5 cm de diâmetro é dada por 6.533,3 dyn/cm. E o desvio percentual $D(\%)$. FONTE: o autor.

Tabela 2.7 – Valores das constantes elásticas obtidas por meio das Equações e considerando a média dos valores e (b) por meio da inclinação das retas dos gráficos. FONTE: o autor.

Tabela 2.8 – Dados dos períodos médios para cada sistema massa-mola (mola de cm de diâmetro e cm de comprimento, e massa de g). Extraídos das Tabelas 2.4, 2.5 e 2.6. FONTE: o autor.

Tabela 3.1 - Dados comparativos, por grupo, a partir da determinação da constante elástica em Exp. 01 e Exp. 02. A coluna D(%) representa o desvio percentual entre os resultados obtidos em Exp. 01 e Exp. 02. Cabe considerar que o caso estático possui menos chances de erros, e, portanto, fornece valores mais próximo do real. FONTE: o autor.

Quadro 1.1 - Organização da Fundamentação Teórica. FONTE: o autor.

Quadro 2.1: Ficha Técnica da Sequência Didática. FONTE: o autor.

Quadro 2.2 – Cronograma de Aplicação da SD. Em que QPr se refere ao questionário prévio e QPo ao questionário pos aplicação dos experimentos. FONTE: o autor.

Quadro 2.3 - Questionário 01 de concepções prévias (QPr1) aplicado aos estudantes antes da realização do experimento 01 (Exp. 01): Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal: Lei de Hooke- Método Estático. FONTE: o autor.

Quadro 2.4 - Questionário 02 de concepções prévias (QPr2) aplicado aos estudantes antes da realização do experimento 02 (Exp. 02) - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal: Lei de Hooke- Método Dinâmico. FONTE: o autor.

Quadro 2.5 - Este questionário de concepções prévias, Questionário 03 (QPr3), foi aplicado aos estudantes antes da realização do Exp. 03 (Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - Lei de Hooke - Associação de molas em Série e em Paralelo. FONTE: o autor.

Quadro 2.6 - Questionário 04 de concepções prévias (QPr4) aplicado aos estudantes antes da realização do Exp. 04 - Conservação de energia em materiais elásticos: o curioso caso da “lata energética” FONTE: o autor..

Quadro 2.7 - Roteiro experimental 01 (Exp. 01) - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - método estático. FONTE: o autor.

Quadro 2.8: Roteiro experimental 02 (Exp. 02): Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - método dinâmico. FONTE: o autor.

Quadro 2.9 - Roteiro experimental 03 (Exp. 03): Determinação da constante elástica de molas helicoidais de forma dinâmica utilizando a associação de molas em série e em paralelo. FONTE: o autor.

Quadro 2.10 - Roteiro experimental 04 (Exp. 04) - Conservação da Energia Mecânica em materiais deformáveis - o curioso caso da “lata energética” a partir do armazenamento de energia potencial. FONTE: o autor.

Quadro 2.11 - Questionário Avaliativo 01 (QPo1) aplicado posteriormente à realização do Experimento 01. FONTE: o autor.

Quadro 2.12 - Questionário Avaliativo 02 (QPo2) aplicado após a realização do Exp. 02. FONTE: o autor.

Quadro 2.13 - Questionário Avaliativo 03 (QPo3) aplicado após a realização do Exp. 03. FONTE: o autor.

Quadro 2.14 - Questionário Avaliativo 04 (QPo4) aplicado após a realização do Exp. 04. FONTE: o autor.

Quadro 3.1 – Transcrição das respostas de alguns estudantes antes (QPr2) e após (QPo2) a realização do Exp. 02. FONTE: o autor.

Quadro 3.2 - Transcrição das respostas de alguns estudantes sobre a função dos materiais presentes no sistema confeccionado "lata energética". Fonte: o autor.

Lista de Abreviaturas

CEAT – Colégio Estadual Antonio Tortato

CGS – Sistema de unidades centímetro, grama e segundo

DCE – Diretrizes Curriculares Estaduais

DFI – Departamento de Física

EMN – Ensino Médio e Normal

MEC – Ministério da Educação

MHA – Movimento Harmônico Amortecido

MHS – Movimento Harmônico Simples

MNPEF – Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

PCN – Parâmetros Curriculares Nacionais

PPC – Proposta Pedagógica Curricular

PR – Paraná

SD – Sequência Didática

SI – Sistema Internacional de Unidades

SIC – erat scriptum – assim estava escrito

TIC – Tecnologia da Informação e Comunicação

UEM – Universidade Estadual de Maringá

INTRODUÇÃO

A motivação deste trabalho surgiu a partir do momento em que o Colégio Estadual Antonio Tortato – Ensino Médio e Normal (Município de Paranacity – PR) recebeu do Ministério da Educação (MEC) – após remanejamento realizado pelo Núcleo Regional Estadual de Educação de Paranaíba – PR – conjuntos para laboratório, contendo materiais para práticas experimentais de Física, nos assuntos de termologia, eletricidade - magnetismo e mecânica.

Dos materiais recém-chegados ao colégio, no ano de 2016, o que mais chamou a atenção fora o *kit* de mecânica. Mais especificamente o que continha molas helicoidais e massas com seus valores identificados. O *kit* em questão apresentado no decorrer desta dissertação é elemento principal do produto educacional (PE) proposto, não possuía um manual específico e nem propostas de atividades que poderiam ser desenvolvidas para utilização do mesmo.

Diante do exposto, surgiu então, a ideia de desenvolver um material didático que fosse eficiente e atendesse os estudantes e professores, objetivando a inserção de atividades práticas nas aulas de Física.

Principalmente, na área de mecânica que são pouco explorados experimentalmente em termos da Lei de conservação de energia mecânica. Além disso, experimentos envolvendo molas helicoidais também são pouco explorados no Ensino Médio, ora pelo tempo da hora-aula semanal disponível para o desenvolvimento desta componente curricular, ora pelo pouco material experimental disponível nos livros didáticos sobre o assunto.

Portanto, no presente trabalho de mestrado, propôs-se a elaboração de textos experimentais dentro do contexto de desenvolvimento e aplicação de uma sequência didática, com o intuito de trabalhar a determinação da constante elástica de molas helicoidais por diferentes métodos, bem como explorar a Lei de Conservação de Energia Mecânica, utilizando o material recebido.

Nesta proposta, engloba a apresentação aos estudantes do Ensino Médio a importante lei física formulada pelo brilhante Robert Hooke, não meramente por meio de cálculos mirabolantes e/ou aulas expositivas maçantes, mas por meio de

uma sequência didática com experimentos potencialmente significativos que pudessem levar os estudantes a pensarem e discutirem sobre tais conceitos.

Os experimentos utilizando o *kit* recebido, não são inéditos, porém normalmente não são apresentados da forma aqui proposta, em um único texto, e aplicáveis em sala de aula, dentro do contexto da componente curricular.

O uso de experimentos para o processo ensino-aprendizagem está ancorado entre outros, nas Diretrizes Curriculares do Estado do Paraná para o ensino de Física, que afirma que a experimentação é um importante e necessário recurso durante o desenvolvimento das aulas:

A experimentação, no ensino de Física, é importante metodologia de ensino que contribui para formular e estabelecer relações entre conceitos, proporcionando melhor interação entre professor e estudantes, e isso propicia o desenvolvimento cognitivo e social no ambiente escolar. (DCE, 2008 – p.56). [*ParFís08*]

O sistema trabalhado foi o massa-mola, que esteve presente em praticamente toda aplicação da sequência didática. E, serviu como apoio para que pudéssemos trabalhar em sala de aula conteúdos envolvendo o conceito de energia cinética e potencial, bem como o princípio de conservação da energia mecânica, visto que normalmente o sistema massa-mola é explorado por meio das Leis de Newton. Também, buscou-se o máximo de possibilidades que pudessem ser desenvolvidas com os estudantes, tais como, período de oscilação, frequência, interpretação de dados tabelados por meio de gráficos.

Percebemos com a aplicação deste trabalho que quando planejamos bem, seja uma aula ou uma sequência de aulas, obtemos bons resultados. Conseguimos amenizar o fato de a Física ser considerada o “terror” dos estudantes e passar a ser prazerosa.

Este trabalho almejou desenvolver atividades pertinentes à prática docente, objetivando:

- Produzir um material didático que possa ser utilizado por demais turmas e professores no intuito de ofertar aplicabilidade aos conjuntos de massas e molas;
- Inserir os estudantes nas realizações de atividades em sala de aula em relação ao ensino de Física no Ensino Médio;

- Estimular o pensamento crítico dos estudantes em relação aos fenômenos físicos pouco explorados experimentalmente – neste caso, a lei de Hooke e conservação de energia mecânica;
- Trabalhar de forma interdisciplinar com outras áreas do ensino, tais como, a matemática (interpretação de gráficos e tabelas) e a língua portuguesa (interpretação de manuais experimentais) além de outras áreas significativas em cada etapa da sequência didática;
- Proporcionar ao docente uma forma de analisar as avaliações dos estudantes na concepção de David Ausubel – aprendizagem significativa – de modo que prevaleça o desenvolvimento cognitivo dos estudantes acerca dos conteúdos físicos desenvolvidos.
- Estabelecer conexões entre o cotidiano dos estudantes com a Ciência em sala de aula, de modo que haja mudanças significativas de concepções pré-determinadas.

Definidos os objetivos deste trabalho, detalharemos no decorrer desta dissertação como aconteceram as etapas propostas pela sequência didática; de forma que o presente trabalho está exposto conforme segue.

No Capítulo 1 apresenta-se a fundamentação teórica subdividida em duas seções: a primeira relata os conteúdos físicos necessários e contextualizados na sequência de aulas propostas, e na segunda discorreremos sobre as definições de D. Ausubel sobre a teoria de aprendizagem significativa e as concepções de Antoni Zabala sobre sequências didáticas; no Capítulo 2 apresentamos, detalhadamente, o produto educacional (PE) e seu desenvolvimento; o Capítulo 3 descreve os resultados, análises e discussões obtidas com a aplicação do PE; e, no Capítulo 4 apresentamos as considerações finais inerentes à aplicação e desenvolvimento do PE. Seguida pelas Referências, apresentadas em ordem alfabética.

No Anexo A, é apresentado o termo de autorização para aplicação do PE na escola e no Anexo B a declaração de Revisão ortográfica do presente trabalho. E, por fim no Apêndice A encontra-se o Produto Educacional em separado para seu uso independente da dissertação.

CAPÍTULO 1 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - ASPECTOS FÍSICOS E DE APRENDIZAGEM

Neste capítulo, apresentamos temas relacionados à lei de Hooke, conservação de energia e teoria de aprendizagem, uma vez que estes estão sendo considerados como eixos norteadores desta dissertação. Tal apresentação dar-se-á de acordo com o Quadro 1.1, que trata da organização dos tópicos a serem desenvolvidos nesse estudo.

Quadro 1.1 - Organização da Fundamentação Teórica. FONTE: o autor.

Apresentação dos tópicos de estudo – Aprofundamento teórico	
Referencial Teórico – Conceitos Físicos	Teoria de Aprendizagem
<ul style="list-style-type: none">• Histórico acerca da vida e da obra de Robert Hooke;• Lei de Hooke• Explorando a Lei de Hooke - constante elástica:<ul style="list-style-type: none">❖ Associação em série e em paralelo❖ Métodos: Estático e Dinâmico – via 2ª Lei de Newton;• Conservação de Energia Mecânica e a física nela envolvida;<ul style="list-style-type: none">❖ Constante elástica – Métodos: Estático e Dinâmico – Via Conservação de Energia Mecânica• Experimentação no Ensino de Física.	<ul style="list-style-type: none">• Aprendizagem Significativa de David Ausubel;• Sequência Didática – Antoni Zabala;

Daremos início a este referencial teórico, relatando alguns aspectos históricos da Lei de Hooke com uma sucinta biografia de Robert Hooke; explorando, a seguir, a Lei de Hooke propriamente dita e sua aplicação em associações de molas

helicoidais. E, por fim, abordaremos o princípio de conservação de energia mecânica constituindo, assim, os principais conteúdos de Física abordados neste trabalho.

1.1 Aspectos Históricos da Lei de Hooke

De acordo com Evangelista (2011) “[...] é preciso insistir que fazer história da física é um empreendedorismo de grande envergadura”. [Evan11]. Acreditamos que um embasamento teórico sobre o assunto seja de grande valia, uma vez que a parte histórica da Física que se refere a Robert Hooke é, muitas vezes, omitida, principalmente as suas contribuições valiosas sobre Mecânica. A necessidade em se abordar, ainda que minimamente, um pouco da vida e da obra de Hooke surge do pensamento de que a Ciência não pode ser tratada como uma “coisa” acabada. A Ciência deve ser tratada como um processo histórico em construção.

Além disso, inserir conceitos da História da Física no âmbito do ensino médio assim como conceitos científicos, remonta as mudanças de época e do que se conhece sobre Universo; proporcionando assim, o pensamento físico que se espera que os alunos melhorem ou passem a adquirir, caso contrário, daremos aos estudantes a ideia de “Ciência Pronta” ou “Física Pronta”, baseada em cálculos mirabolantes, matematizando.

O despertar acerca de novas concepções sobre o Universo em si e do ser humano, foram pensados através dos séculos, bem como, a afirmação mecanicista geral, racional e simples de grandes e brilhantes mentes da Física tais como: Galileu Galilei (1564-1642), René Descartes (1564-1650), Christian Huygens (1629-1695), Isaac Newton (1642-1727), Gottfried Leibniz (1646-1716) além de outros grandes nomes cujos trabalhos foram fundamentados em abstrações matemáticas, observações e experimentações já sugeridas por Francis Bacon (1561-1626) -; idealizador do modelo de investigação por meio do método indutivo, baseado na observação precisa e minuciosa dos fenômenos naturais. [Bri08]

Tais feitos foram primordiais para o novo modo de interpretação do Universo principalmente no período compreendido entre o início do século XVI e meados do século XVIII, em que se produzia na Europa uma importante fase da História denominada Revolução Científica. Dentre os grandes espíritos inovadores que lideraram a Revolução Científica no período anteriormente mencionado, faz-se

merecedor de figurar dentre os já nominados, o célebre Robert Hooke, uma vez que esse cientista também fora um dos líderes do denominado: “renascer do conhecimento”. [Bri08]

Cabe ressaltar, que esse físico inglês era multifacetado e deve-se a ele muitas realizações notáveis, mas (infelizmente) pouco conhecidas, em vastas áreas da Ciência tais como a Biologia (um dos precursores), a Química e a Física. Neste trabalho de mestrado, damos ênfase a conhecida e famosa Lei de Hooke. Lei esta aplicada principalmente em corpos deformáveis elasticamente. Além disso, relacionamos a lei de Hooke com as Leis de Newton, bem como outra vertente, que é o Princípio de Conservação da Energia Mecânica, ambos em um sistema massa-mola.

1.2 Biografia Resumida de Robert Hooke

Robert Hooke (Figura 1.1) foi um menino fraco e doente que nasceu em 18 de julho de 1635 em *Freshwater* – Reino Unido - Inglaterra. Filho de um clérigo da Ilha de *Wight* perdeu o pai aos treze anos de idade. Hooke sempre teve grande habilidade manual para a construção de brinquedos, pinturas e desenhos. Chegou ainda criança a construir um relógio de madeira que realmente funcionava. Familiarizou-se com a geometria euclidiana e outros tópicos matemáticos, quando ingressou na *Westminster School* onde também aprendeu hebraico, grego e latim. [Bri08].

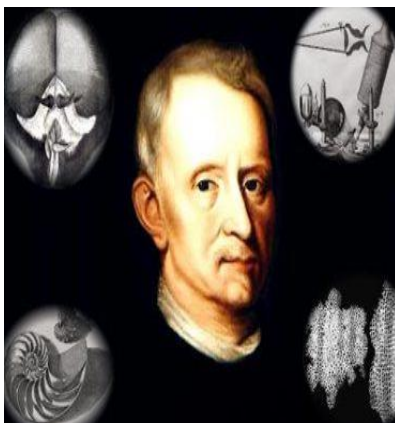


Figura 1.1 - Imagem de uma pintura de Robert Hooke: cientista britânico que contribuiu enormemente em várias áreas da ciência. FONTE: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/biologia/robert-hooke.htm>>.

A seguir, listamos os principais fatos históricos associados a Robert Hooke em relação a sua vida profissional:

- 1653 – Enviado para *Oxford*, onde atuou no coro da *Christ Church* (Igreja Cristã);
- 1655 – Iniciou suas atividades profissionais como assistente do físico e químico anglo-irlandês Robert Boyle (1627-1691), tendo colaborado com Boyle na construção da célebre bomba pneumática denominada “boyliana” uma vez que Hooke possuía habilidade em construções;
- 1662 – Obteve o grau de *Master of Arts* (Mestre em Artes) na Universidade de Oxford; Nomeado (por indicação de Boyle) a *Curator of Experiments* (curador de experimentos) da recém fundada *Royal Society of London*;
- 1663 – Hooke foi eleito “*fellow*” da Universidade de Oxford, sendo nomeado secretário em 1677, por morte de Henry Oldenburg (1618-1677). Renunciou ao cargo em 1683, mas permaneceu como membro até a sua morte;
- 1664 – Passou a exercer o cargo de professor de geometria no Gresham College, uma conceituada instituição científica, onde também figuravam outros nomes, tais como, o arquiteto e astrônomo Christopher Wren (1632-1723) e o matemático Isaac Barrow (1630-1677);
- 1666 – Hooke participou ativamente como *Wren* na reconstrução da cidade de Londres após um grande incêndio;
- 1678 – Publicou entre outras obras¹: *Lectures de Potentia Restitutiva, or of Springs – Explaining the Power of Springing Bodies*”.

Em relação ao campo pessoal sabe-se que Hooke nunca se casou. Ele sempre foi inquieto, atormentado e instável. Sem sombra de dúvidas foi efetivamente um dos mais brilhantes cientistas do século XVII. Embora acusado por alguns autores como uma das personalidades mais conflituosas do mundo da

¹“Aulas “*de potentia restitutiva*”, ou de Molas - Explicando o Poder dos Corpos em oscilação” Tradução do autor. Fonte: <https://books.google.com.br/books?id=LAtPAAAACAAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false> acesso em 16/06/2019.

ciência devido ao seu temperamento explosivo e, sobretudo suas questões com *Sir* Isaac Newton, trouxeram-lhe imensuráveis desafetos durante a vida e um “injustificado” esquecimento depois de morto.

Sabe-se que Newton era presunçoso, conhecido por sua genialidade, era autoritário e principalmente rancoroso, não admitindo que alguém pudesse contestar as suas teorias, tampouco igualá-las. A Hooke não faltava grandeza. Este passou o tempo em permanente conflito com Newton e pagou caro por isso, uma vez que tornar-se inimigo de Isaac Newton era fatal, pois tendo razão ou não o *Sir* era implacável. Conforme Gordon (1990), estas “brigas” constantes entre estes dois nomes da ciência podem explicar o “esquecimento” de Hooke no decorrer dos tempos uma vez que Isaac Newton teve a sorte de viver mais vinte e cinco anos após o falecimento de Hooke. Dedicando, inclusive, grande parte de seu tempo em denegrir a memória do seu antagonista. [Gor90]

Robert Hooke sempre trabalhou durante toda a vida, não se preocupando com seu estado de saúde que se agravava dia após dia. Automedicava-se com inúmeros produtos que o envenenavam mais do que curavam. Faleceu aos 68 anos, no dia 03 de março de 1703, em Londres. [Bri08]

1.3 Lei de Hooke

Nussenzveig (2002) afirma que Hooke enunciou a sua lei sob a forma de um anagrama. Esta forma comum de divulgação de resultados científicos no século XVII fora a maneira encontrada por Hooke para garantir a propriedade intelectual de sua obra, além de evitar que outros cientistas pudessem levar mais adiante suas ideias. Hooke enunciou o seguinte anagrama: “*ceiinossttvi*” que após dois anos fora decifrado pelo próprio Hooke como “*ut tensio, sic vis*”. Quando traduzido do latim, o termo significa “*como a deformação, assim a força*”. Pode-se concluir que o cientista britânico afirmava que a força é proporcional à deformação². [Nus02] Sendo o analisado por Hooke a deformação do tipo elástica³.

² Ao aplicar uma força $F = P$ e esta deformar de Δy , se a força dobrar a deformação será de $2\Delta y$, se triplicar a força a deformação será de $3\Delta y$, e assim por diante. A deformação é uma função linear: $F \propto \Delta y$.

³ Fisicamente há dois tipos de deformações: a plástica e a elástica. A plástica é o tipo de deformação permanente, que ao se tirar a força aplicada o material não retorna a sua forma e comprimento original. E, a do tipo elástica, ao retirar a força aplicada do material, este retorna ao seu tamanho e forma original.

Esse comportamento mecânico foi observado por Hooke em 1660 e publicado em 1676 quando analisava um sistema massa-mola na vertical, em que uma das extremidades da mola se encontrava fixa em um suporte e na outra acoplava as massas, semelhante ao ilustrado na Figura 1.2 (a).

Portanto, ele observou o efeito da variação da força peso (força externa) que provocava uma variação no comprimento da mola e nesse surgia uma força na mola (\vec{F}_m) que atuava em sentido oposto à do movimento da massa suspensa, por isso denominada de força restauradora (Figura 1.2 (a)). A constante de proporcionalidade entre essa força restauradora e o alongamento (Δy) ocorrido, é a denominada de constante elástica (k) da mola. Situação essa, válida também se o processo for de uma compressão na mola por uma força externa (Figura 1.2 (b)).

Assim, a Lei de Hooke, em sua forma matemática atual, aplicada a casos unidimensionais, no caso na direção vertical⁴ (adotada como y), é dada por:

$$F_m = -k\Delta y \quad [1.1]$$

O sinal negativo na Equação [1.1] é devido à força ser do tipo restauradora e, k a constante elástica depender da natureza do material da qual a mola é confeccionada, de seu diâmetro e comprimento em estado natural, bem como do diâmetro do fio. Sua unidade de medida no Sistema Internacional de Unidades (SI) corresponde a Newton por metro (N/m), e em CGS dada por dina⁵ por centímetro (dyn/cm). Cabe ressaltar que quanto maior o valor de k , maior será a rigidez da mola. [Nus02] E, a constante elástica é inversamente proporcional ao comprimento da mola. [MukFer18]

Observa-se⁶ na Figura 1.2:

- Quando a mola é distendida (Figura 1.2 (a)) a partir de $y = 0$, tem-se $\Delta y > 0$ e assim a força da mola é negativa, indicando que a força atuante pela mola age para a cima.

⁴ Adotando o sistema cartesiano, nesta parte de revisão adota-se o seguinte sistema de referência: x na horizontal apontada para a direita, y na vertical apontada para baixo e z perpendicular a x e y entrando no plano. Indicada no canto direito superior da Figura 1.2.

⁵ 1 dyn = 10^{-5} N.

⁶ Texto adaptado da referência [Hall11], que apresenta o movimento do sistema massa-mola na horizontal.

- Quando a mola é comprimida (Figura 1.2 (b)) a partir de $y = 0$, tem-se $\Delta y < 0$ e, conseqüentemente, a força da mola age para baixo e é positiva.

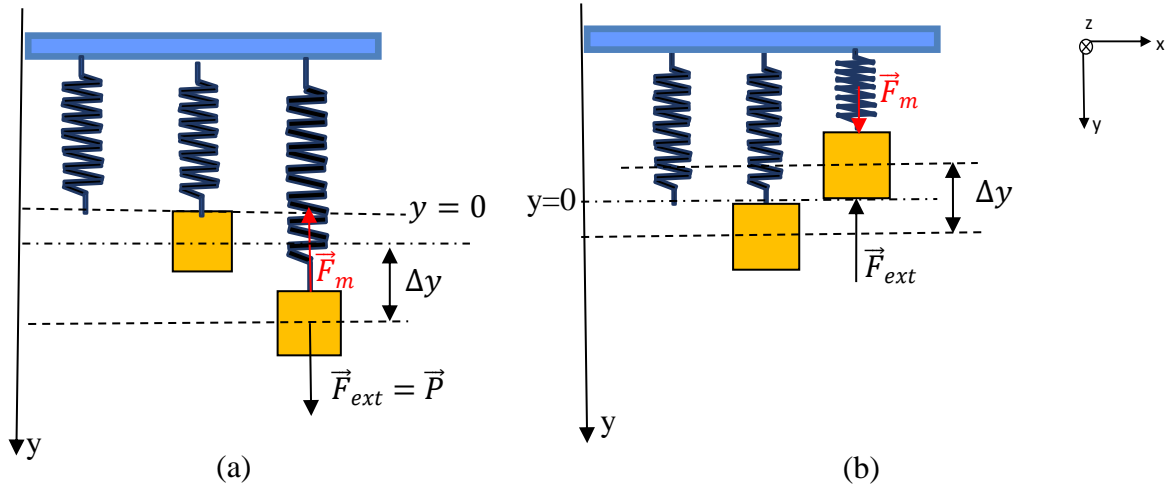


Figura 1.2 - Desenho esquemático representando de forma unidimensional a força exercida pela mola, \vec{F}_m , quando esta é: (a) distendida e (b) comprimida, de uma quantidade Δy , por meio de uma força externa, \vec{F}_{ext} . Sendo $y = 0$ a mola em seu comprimento relaxado (estado natural). E, no canto direito o sistema de coordenadas cartesiano, indicando a direção e sentido adotado neste trabalho. FONTE: o autor.

Na próxima seção apresentam-se a teoria das situações que serão estudadas experimentalmente em sala de aula.

1.4 Explorando a Lei de Hooke

Nesta seção, analisar-se-á, a Lei de Hooke, para o sistema massa-mola, de um sistema em série e em paralelo. Posteriormente, obtêm-se a expressão da constante elástica k , via segunda lei de Newton: para o caso estático, em que se supôs que a massa é deslocada pela atuação somente da força peso, a partir da posição em que se encontra no seu estado natural, e aferida o deslocamento por ela provocada; para o caso dinâmico, quando a massa oscila em torno do ponto de equilíbrio, em um movimento harmônico simples (MHS), sendo esta a forma mais desenvolvida nos textos como, por exemplo, as referências [MukFer⁷18] e [Per13].

⁷ A primeira versão redigida do texto pelos autores é do ano de 2005.

1.4.1 Associação de molas helicoidais e determinação da constante elástica k da mola

Nesta seção analisam-se como fica um sistema com molas associadas em série e em paralelo. As molas associadas serão dispostas considerando a direção vertical e sentido positivo para baixo, considerando um sistema de eixos cartesianos direção de y e sentido $+\hat{j}$. Os três eixos estão perpendiculares entre si, logo, a direção de x na horizontal – positivo da esquerda para a direita, e a direção z perpendicular ao plano, sentido positivo entrando no plano, indicadas ao lado das figuras.

1.4.1.1 Associação de molas em série

Considere duas molas helicoidais (mola 1 e mola 2) com massas desprezíveis, de constantes elásticas k_1 e k_2 , respectivamente, associadas em série conforme apresentado na Figura 1.3 (a). Na extremidade livre da mola 2, é conectada uma massa, que ao ser liberada irá se deslocar verticalmente sob a ação da força peso e uma força de mesma intensidade, direção e sentido, atuará na mola 2 e 1, Figura 1.3 (b). Tal que, as elongações sofridas pelas molas na associação, utilizando a Equação [1.1], já considerando que⁸ $|\vec{F}_{el}| = |\vec{F}_{ext}| = |\vec{P}|$, bem como que as variações nas molas (a título de simplificação na notação): $\Delta y_1 = y_1$ e $\Delta y_2 = y_2$, são:

$$y_1 = \frac{P}{k_1}, \quad [1.2 \text{ a}]$$

$$y_2 = \frac{P}{k_2}. \quad [1.2 \text{ b}]$$

Ao associarmos molas em série, a força ($\vec{F}_{ext} = \vec{P}$) que atua sobre cada uma das molas acopladas, bem como as respectivas distensões sofridas, y_1 e y_2 , são independentes. O conjunto de molas apresentada na Figura 1.3 (c) possui uma

⁸Esse sistema pode ser visto na simulação disponível em: <https://phet.colorado.edu/sims/html/hooks-law/latest/hooks-law_pt_BR.html>, só muda a direção do deslocamento, considerado na horizontal.

distensão $y_s = y_1 + y_2$ (sendo o s de série). Utilizando o fato de que o sistema está em equilíbrio estático, isto é: $|\vec{F}_{el}| = |\vec{F}_{ext}| = |\vec{P}|$, podemos escrever:

$$y_s = y_1 + y_2 = \frac{P}{k_s}, \quad [1.3]$$

em que k_s é a constante elástica equivalente das molas associadas em série.

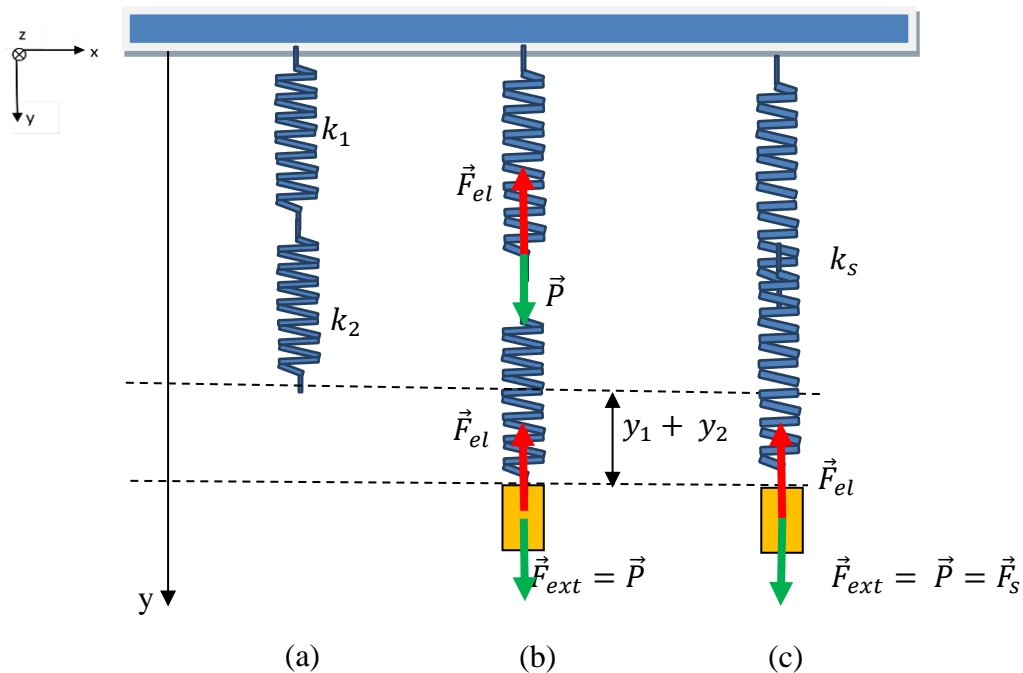


Figura 1.3 - Ilustração de duas molas de constantes k_1 e k_2 , associadas em série: (a) sem massa suspensa na extremidade livre da associação; (b) sistema em equilíbrio estático com uma massa na extremidade livre da mola; (c) \vec{F}_{ext} = força externa; \vec{P} = força peso; \vec{F}_{el} = força elástica; \vec{F}_s = força na série; k_s = constante elástica equivalente da associação em série; y_1 e y_2 são as elongações das respectivas molas. O sistema de referência está indicado no canto superior esquerdo da figura. As massas das molas são desprezíveis em relação à massa suspensa. FONTE: o autor.

Utilizando as Equações [1.2 a] e [1.2 b] na Equação [1.3], obtemos o seguinte:

$$\frac{P}{k_1} + \frac{P}{k_2} = \frac{P}{k_s},$$

$$\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{1}{k_s}. \quad [1.4]$$

Assim, utilizando a Equação [1.4] podemos determinar a constante elástica da associação em série de duas molas, conhecidas as constantes elásticas de cada mola individualmente:

$$k_s = k_{eq.} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}. \quad [1.5]$$

Generalizando para n molas associadas em série, k_s pode ser obtida pela Equação [1.5].

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}. \quad [1.6]$$

1.4.1.2 Associação de molas em paralelo

Quando duas ou mais molas helicoidais, de mesmo comprimento, estão associadas em paralelo, estas dividem a força aplicada de forma igual. Para isso, considera-se que a força \vec{F} atua no ponto médio do suporte que as une, e por consequência uma força $\vec{F} = \sum_{i=1}^n \frac{\vec{F}_i}{n}$ sendo i o número da mola e n o número de molas, atuará na extremidade de cada mola e as distenderá pela mesma quantidade y .

Para analisar essa situação, considere um sistema com duas molas, de constantes k_1 e k_2 , e mesmo comprimento, associadas em paralelo penduradas verticalmente em um suporte. Na outra extremidade das molas há uma haste rígida que as mantém acopladas (Figura 1.4). Esse será o estado inicial do sistema (Figura 1.4 (a)).

Após atuar a força externa \vec{F}_{ext} na haste rígida, conectando uma massa m , no ponto médio entre as duas molas, Figura 1.4 (b), há um deslocamento de quantidade y , que é a distensão sofrida pelas molas. Como a força é distribuída de forma igual entre elas⁹, estas foram consideradas como \vec{F}_1 (força na mola 1) e \vec{F}_2 (força na mola 2).

⁹ Situação que pode ser observada por meio de simulação no site: https://phet.colorado.edu/sims/html/hookes-law/latest/hookes-law_pt_BR.html.

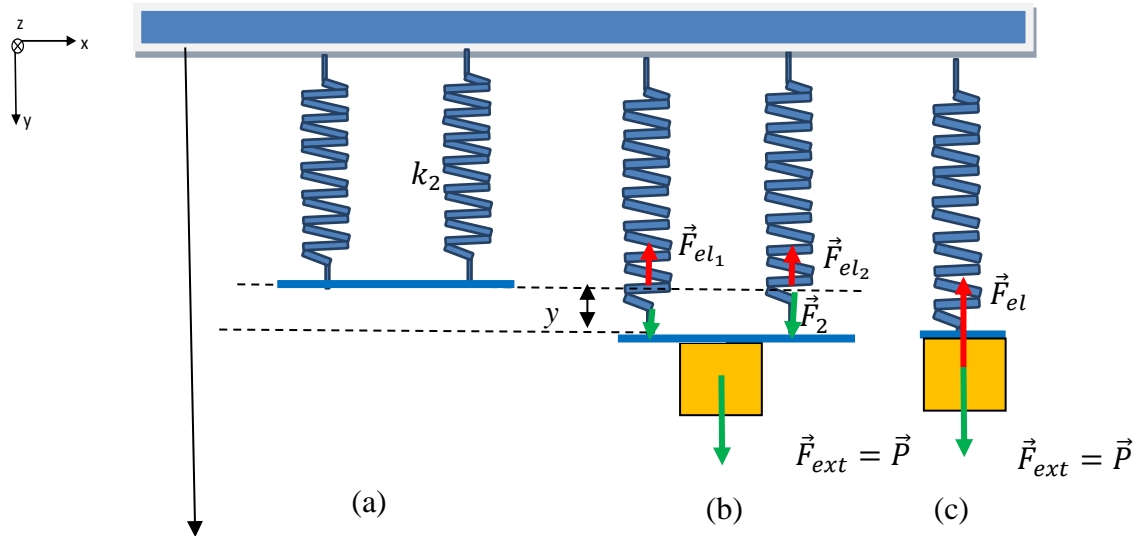


Figura 1.4 - Figura esquemática indicando: (a) uma associação de duas molas em paralelo com constantes elásticas k_1 e k_2 ; (b) \vec{F}_{ext} é a força externa aplicada às molas em paralelo, dada por \vec{P} , força peso; k_p = constante elástica equivalente das molas associadas em paralelo; \vec{F}_{el1} e \vec{F}_{el2} são as forças elásticas em cada uma das molas; (c) o sistema equivalente da associação em paralelo. As massas das molas e da haste rígida são desprezíveis em relação a massa suspensa. FONTE: o autor.

Na Figura 1.4 (c) apresenta-se o sistema equivalente da conexão das duas molas em paralelo, k_p , tal que a força aplicada \vec{F} e a força elástica \vec{F}_{el} terão a mesma magnitude em que k_p é a constante elástica da associação das molas em paralelo:

$$F = F_1 + F_2 = k_p y. \quad [1.7]$$

Considerando que cada força aplicada é igual a força elástica oposta a mesma e dada pela Equação [1.1] em que $\Delta y = y$, podemos escrever a equação [1.7] como $k_1 y + k_2 y = (k_1 + k_2) y = k_p y$, logo:

$$k_p = k_1 + k_2. \quad [1.8]$$

Portanto, a constante elástica equivalente no caso de molas associadas em paralelo é a soma das constantes elásticas de cada mola individualmente.

Uma relação geral para um conjunto de n molas associadas em paralelo é expressa matematicamente por [1.9]:

$$k_p = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n = \sum_{i=1}^n k_i. \quad [1.9]$$

Na próxima seção serão apresentadas duas situações a trabalhar as configurações em série e/ou em paralelo, que serão o caso em que o deslocamento é feito de forma constante, e outra oscilando em torno de um ponto de equilíbrio, denominados de método estático e dinâmico, respectivamente. Para a dedução das equações será considerada o caso de uma mola na vertical, variando as massas que serão suspensas.

1.4.2 Determinação da constante elástica k da mola para o método estático e dinâmico – via segunda Lei de Newton

Na Equação [1.1], a Lei de Hooke em sua forma matemática atual é atribuída a corpos deformáveis elasticamente, tais como, elásticos e molas helicoidais. Consideremos a seguir, a situação para molas helicoidais, em que será determinada a expressão da constante elástica para os casos estático (sem oscilação, aceleração nula, $a = 0$) e dinâmico (com oscilação em Movimento Harmônico Simples – MHS, aceleração não nula ($a \neq 0$), obtidas da forma tradicional partindo do princípio da dinâmica (a segunda Lei de Newton, para quando a massa em movimento se mantém constante).

1.4.2.1 Determinação da constante elástica k da mola - Método Estático

O sistema massa-mola em equilíbrio, bem como, as forças atuantes no mesmo, são os representados na Figura 1.2. Adotando a situação apresentada na Figura 1.2 (a), um deslocamento unidimensional, na vertical, em que a força externa é a força peso. Aplicando a segunda lei de Newton, $\sum F_y = m a_y$, para o caso em que a massa do corpo se mantém constante, e considerando a direção do deslocamento sendo Δy , temos que:

$$P - F_m = m a_y. \quad [1.10]$$

Substituindo, a força peso por $P = mg$, em que, g é a aceleração gravitacional da Terra¹⁰ [Mer99] e a força da mola $k \Delta y$, e ainda considerando a aceleração nula (estático), a Equação [1.10] torna-se:

$$mg - k\Delta y = 0 . \quad [1.11]$$

Isolando a constante elástica na Equação [1.11] de modo a obtermos uma equação que nos permite calcular a constante elástica pelo método estático $k_{estático}$:

$$k_{estático} = \frac{mg}{\Delta y} . \quad [1.12]$$

Como já disposto neste capítulo, a constante k possui como unidade de medida no SI, N/m (Newton por metro). Em CGS, dyn/cm (dinas/centímetro), em que $1N = 10^5 \text{ dyn}$.

O gráfico que representa a Equação [1.12] é o da Figura 1.5, sendo este um esboço de um gráfico do módulo da força externa ($|\vec{F}_{ext}| = |\vec{P}|$) *versus* o módulo do deslocamento ($|\Delta\vec{y}|$), no caso considerando uma distensão da mola como apresentado na Figura 1.2 (a), e representado na Figura 1.5;

Nesse caso, considerando massas sendo acrescidas¹¹ e a cada uma medindo o deslocamento causado pela força peso ($\vec{P} = m\vec{g}$), atuante na mola, obtém-se um gráfico linear. Cada cor equivale a uma mola de mesmo material e comprimento diferente, ou material diferente e mola de mesmo comprimento. Tal que: $k_1 > k_2 > k_3$. Lembrando que a força da mola possui um sinal negativo (resistente à distensão), oposta a força peso.

Ainda na Figura 1.5, leva-se em consideração a força peso inicial referente à massa da mola ou qualquer outra massa suspensa junto à mola na posição inicial como a haste rígida na Figura 1.4 (a), que normalmente convencionam-se como

¹⁰O valor nominal "médio" na superfície da Terra, conhecida como gravidade padrão é, por definição, $9,80665 \text{ m/s}^2$.

¹¹Isso pode ser verificado experimentalmente, utilizando espiral de encadernação que tenha certa elasticidade, e massas de valores conhecidos (tal que não deforme a mola de forma permanente), feitas de qualquer material, que possam ser acrescidas na extremidade da mola. Um suporte e uma régua para realizar a leitura do deslocamento.

desprezíveis quando comparadas as massas que serão adicionadas a ela e que provocarão o deslocamento Δy a partir de um ponto inicial y_0 .

Esse valor se refere ao **coeficiente linear** ($F_0 = P_0$) da reta, e normalmente surge ao se realizar o ajuste da reta, e não na relação de proporcionalidade de interpretação direta do gráfico $F \propto \Delta y^n$, no caso $n = 1$ (comportamento linear) e k a constante de proporcionalidade (no caso a constante elástica da mola): $F = k\Delta y$. Visto que nessa equação supõe-se que $F_0 = P_0 = 0$ no ponto inicial $y_0 = 0$.

Ressaltando que, k é o coeficiente angular da equação da reta ajustada ($F = F_0 + k \Delta y$) que será o mesmo da relação direta de proporcionalidade entre F e Δy ($F = k\Delta y$), quando obtida pela inclinação da reta do gráfico $F \times \Delta y$.

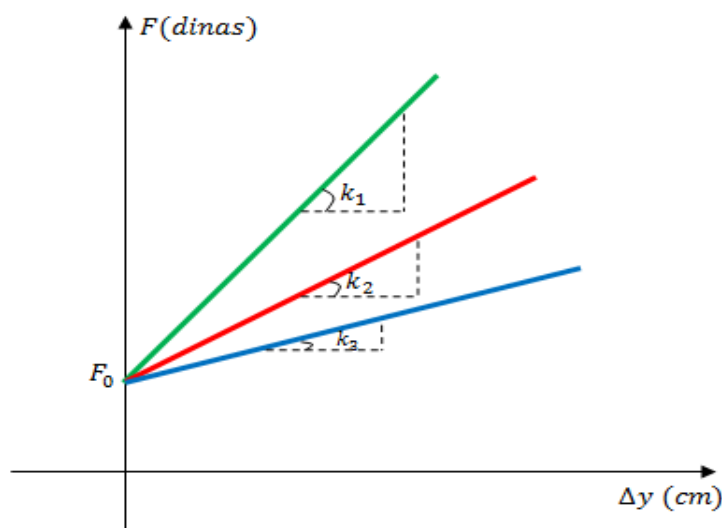


Figura 1.5 - Esboço de um gráfico representando o comportamento linear do módulo da Força ($F = P = mg$) versus módulo do deslocamento (Δy), para 3 molas com características diferentes: comprimento ou material; O coeficiente angular da reta $F_i = F_0 + k_i \Delta y$, sendo $i = 1, 2, 3$, é a constante elástica da respectiva mola e o coeficiente linear, F_0 , dessa reta é a força peso inicial que atua na mola, inclusive sua massa caso não seja desprezível. FONTE: o autor.

Vejamos na sequência, como fica a equação da constante elástica para um processo dinâmico - mola oscilando na vertical em torno de um ponto de equilíbrio.

1.4.2.2 Determinação da constante elástica k da mola - Método Dinâmico

Quando o sistema massa-mola não está em equilíbrio estático, também é possível determinar a constante elástica k da mola. Desprezando as forças

dissipativas¹², nesse caso, há uma aceleração resultante diferente de zero na Equação [1.10]:

$$P - F_m = ma_y. \quad [1.13]$$

Considerando, $a_y = a$, a aceleração resultante da massa m acoplada à extremidade livre da mola. Nesse caso, a massa irá oscilar em torno do ponto de equilíbrio, $y = y_0 = 0$, (Figura 1.6).

Sendo, a amplitude máxima de oscilação de $+y$ a $-y$. Observando que o sentido da força da mola é sempre único, fazendo com que o corpo oscile na direção vertical, subindo e descendo.

Experimentalmente, caso fosse considerado um longo tempo, ter-se-ia o que se chama de Movimento Harmônico Amortecido (MHA) devido a influência da resistência do ar¹³, em que a amplitude vai diminuindo até parar. Ambos os casos podem ser visto em um Pêndulo Simples, por exemplo, no Capítulo 09 da referência [MukFer, 2018].

Mas, se considerarmos o tempo¹⁴ entre 3 a 10 oscilações completas (T -período), dependendo da mola e do sistema, pode-se desprezar a força de resistência da massa com o ar e esse tipo de oscilação é conhecido como Movimento Harmônico Simples (MHS). Além disso, o movimento, posição em função do tempo em um gráfico, é representado por uma função seno ou cosseno da frequência de oscilação no tempo, como será apresentado a seguir.

¹² Como será visto posteriormente (seção 1.7), são forças cuja energia se dissipa ao realizar determinado processo mecânico. O exemplo mais comum é a força de atrito entre um corpo e uma superfície, a energia se dissipa em termos de aquecimento (energia térmica).

¹³ Um tipo de força de atrito do ar com o objeto. No MHA, o resultado de um gráfico da amplitude com relação ao tempo é uma função exponencial decrescente no tempo devido ao amortecimento. Uma simulação deste movimento pode ser visto na referência: <<https://giphy.com/gifs/2A8saq6q3h5mVoSbGp>>. Acesso em 23/06/2019.

¹⁴ Repetir o processo e fazer uma média aritmética simples para diminuir a imprecisão na medida.

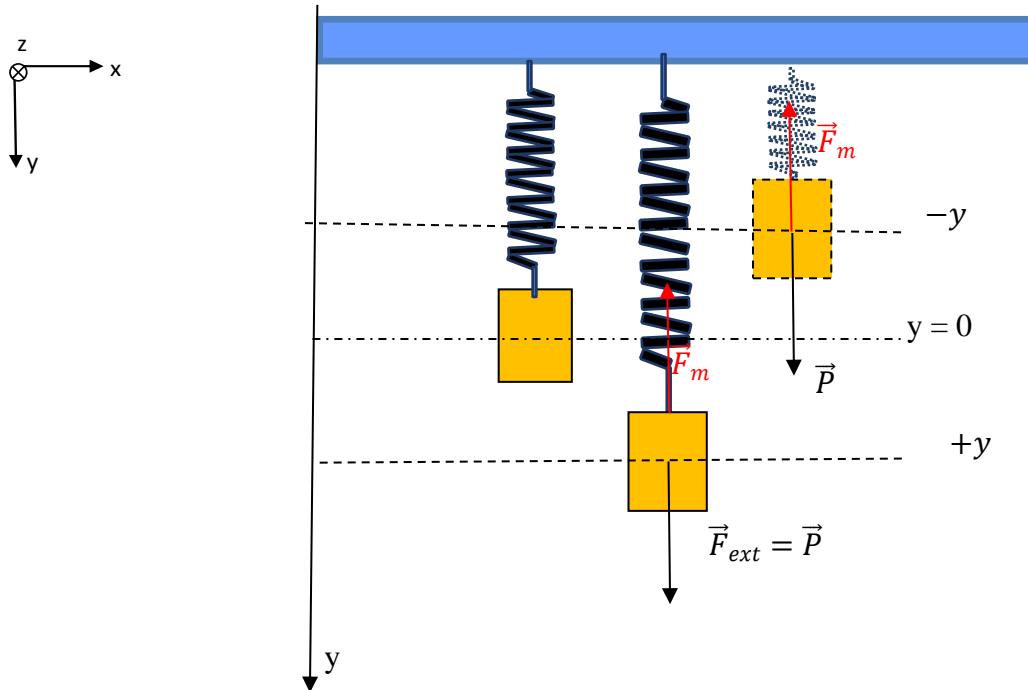


Figura 1.6 - Figura esquemática indicando um sistema massa-mola oscilando em torno do ponto de equilíbrio ($y = 0$). A mola possui constante k , a força externa (no caso a força peso (\vec{P}) do corpo de massa m) atua alongando de uma quantidade y e retorna comprimindo em direção oposta até $-y$. FONTE: figura adaptada da referência. [Hall 11].

A Equação [1.13] torna-se:

$$mg - k(\Delta y - y) = m \frac{d(\Delta y - y)}{dt}. \quad [1.14]$$

Ao considerarmos que: $mg - k\Delta y = 0$, pois é a origem do eixo onde ocorre equilíbrio estático em que: $\frac{d(\Delta y)}{dt} = 0$, obtemos a seguinte equação matemática em sua forma derivada [1.15]:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{k}{m} y = 0. \quad [1.15]$$

A Equação [1.15] é uma equação diferencial de segunda ordem homogênea (EDO), com solução geral expressa por:

$$y(t) = y_{m\acute{a}x} e^{i(\omega t + \varphi)}, \quad [1.16]$$

em que: ω é a frequência angular característica da mola, $y_{m\acute{a}x}$ a amplitude de oscilação e φ é uma fase. A parte real da equação [1.16] é expressa por¹⁵ [Hall11]:

$$y(t) = y_{m\acute{a}x} \cos(\omega t + \varphi), \quad [1.17]$$

sendo essa a solução da Equação [1.15]. Derivando duas vezes a Equação [1.17] em relação ao tempo, temos: $\frac{d^2y}{dt^2} = -y_{m\acute{a}x}\omega^2 \cos(\omega t + \varphi)$; e, substituindo na Equação [1.15] em seu primeiro termo, junto com a Equação [1.17] no segundo termo, obtém-se¹⁶:

$$-y_{m\acute{a}x}\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) + \frac{k}{m}y_{m\acute{a}x} \cos(\omega t + \varphi) = 0. \quad [1.18]$$

Simplificando os termos iguais na Equação [1.18], tem-se que:

$$\omega^2 = \frac{k}{m}. \quad [1.19]$$

Como já informado, T é o período de oscilação do sistema, isto é, o intervalo necessário para que o sistema realize um ciclo completo do seu movimento (que neste caso será o movimento unicamente na vertical¹⁷, de descer de $(-y)$ até (y) e subir de volta até $(-y)$ e considerando matematicamente que a frequência angular é a relação de 2π (percurso da massa em 1 T) pelo período ($\omega = \frac{2\pi}{T}$), obtém-se a Equação [1.20], que relaciona o período T e a constante elástica, k , de uma mola helicoidal utilizando o método dinâmico (oscilatório). [MukFer18] e [Per13].

$$k_{din\acute{a}mico} = \frac{4\pi^2 m}{T^2}. \quad [1.20]$$

¹⁵ $e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \text{sen}(\omega t)$.

¹⁶A função $y(t) = A \cos(\omega t + \theta_0)$ como solução da equação diferencial ordinária (EDO) $\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{ky}{m} = 0$, está disponível no Apêndice B dessa dissertação.

¹⁷Sem que haja a formação de movimento pendular.

Reforçando que, um sistema em que se desprezam as forças dissipativas¹⁸, e oscila em torno de um ponto de equilíbrio é o denominado de movimento harmônico simples (MHS), conforme já discutido nesta subseção 1.4.2.2.

A seguir, entra-se nos conceitos referentes à energia.

1.5 Constante Elástica Via Lei de Conservação de Energia Mecânica

Primeiramente para obtermos a Lei de Conservação de Energia Mecânica, e entre os tópicos estão os que serão utilizados para obter as mesmas expressões das constantes elásticas para o caso estático (Eq. [1.12]) e dinâmico (Eq. [1.20]) por meio dessa Lei.

O conceito de energia, primeiramente está ligado ao de trabalho, visto que de forma simplificada: *Energia é a habilidade de determinado corpo realizar trabalho, e trabalho é a energia transferida por uma determinada força*. Como citado por Halliday:

Trabalho (W) é a energia transferida para um objeto ou de um objeto por meio de uma força que age sobre o objeto. Quando a energia é transferida para o objeto, o trabalho é positivo; quando a energia é transferida do objeto, o trabalho é negativo. (HALLIDAY, *et al* 2016. p. 342). [Hall16]

Como toda força pode realizar trabalho, vejamos como fica o trabalho realizado pela força elástica. Considera-se a partir deste ponto o termo força elástica entre elas está contida a força da mola.

1.5.1 Trabalho realizado pela força elástica

O trabalho (W) realizado por uma força \vec{F} para deslocar um corpo de um ponto inicial i a outro final f , é dado por¹⁹:

$$W_{i \rightarrow f} = \int_i^f \vec{F} \cdot d\vec{l}. \quad [1.21]$$

¹⁸ Neste caso a força dissipativa é força de atrito do corpo com o ar.

¹⁹ Em que: $\vec{F} = F_x \hat{i} + F_y \hat{j} + F_z \hat{k}$ e $\vec{l} = x \hat{i} + y \hat{j} + z \hat{k}$.

Observando que, o trabalho depende da força que realiza o deslocamento e que a força, ou a componente da mesma, deve estar na mesma direção do deslocamento. Bem como, o trabalho total em uma única direção é a soma de todos os trabalhos que fazem o corpo mover-se na direção do deslocamento.

Adotando o sistema unidimensional, em que o deslocamento ocorre na vertical (y), a Equação [1.21] fica escrita na forma²⁰:

$$W_{i \rightarrow f} = \int_i^f F_y dy \cos \theta, \quad [1.22]$$

em que θ é o ângulo entre a força e o deslocamento. A unidade de trabalho é a mesma de energia, Joules ($J = Nm$) no SI.

No caso de nosso sistema, (Figura 1.2 (a)), a força e o deslocamento estão na mesma direção e sentidos opostos²¹, visto que é a força exercida pela mola é no sentido para cima e o deslocamento é para baixo, e a Equação [1.22] fica escrita na forma:

$$W_{i \rightarrow f} = - \int_i^f F_m dy. \quad [1.23]$$

Assim, o trabalho realizado pela força restauradora, \vec{F}_m , quando essa é distendida de sua posição inicial y_0 até a posição final y_1 pela atuação de força externa \vec{F} , é dado por:

$$W_m = - \int_{y_0}^{y_1} F_m dy = - \int_{y_0}^{y_1} (ky) dy = - \frac{1}{2} k (y_1^2 - y_0^2). \quad [1.24]$$

Nota-se pela Equação [1.24] que o trabalho realizado pela mola é negativo visto que: $y_1 > y_0$. Esse fato é justificável visto que o sentido de \vec{F}_m é oposto ao

²⁰ Utilizando a definição de produto escalar: $\vec{A} \cdot \vec{B} = AB \cos \theta$, sendo: A e B o módulo dos vetores \vec{A} e \vec{B} respectivamente, e θ o ângulo formado entre eles.

²¹ $\cos 180^\circ = -1$.

deslocamento de modo que, o trabalho realizado pela mola W_m também seja negativo.

Quando a força externa agir de modo a comprimir a mola conforme apresentado na Figura 1.2 (b), ambas as posições: y_0 e y_1 são negativas, mas $|y_1| > |y_0|$, e a força da mola continua oposta ao sentido do deslocamento. Logo o trabalho continua sendo negativo.

Desta forma, não importa se alongada ou comprimida, o trabalho para uma variação de y_0 a y_1 , será negativo. Fato este também que pode ser visto na Equação [1.24], em que cada extremidade será elevada ao quadrado, como resultado da integral da força elástica (força da mola), portanto não importa o sinal de y_0 e y_1 .

O que influencia no sinal do trabalho realizado pela mola, é o sentido da força aplicada em relação ao sentido da deformação:

- $|y_1| > |y_0|$, distensão/alongada, o $W < 0$ (negativo);
- $|y_1| < |y_0|$, compressão, o $W > 0$ (positivo).

É possível realizarmos uma interpretação geométrica, como normalmente é utilizada no ensino médio²², acerca do cálculo do trabalho realizado pela mola conforme apresentamos na Figura 1.7. Isto é possível visto que o trabalho é representado pela área acima ou abaixo da curva de um gráfico da força (F) pelo deslocamento (y). Na Figura 1.7 podemos observar que a força exercida pela mola é linear, dada pela reta decrescente em um processo de alongação da mola, quando este varia de uma posição y_0 a y_1 . [Nuss02]

²²Visto que a força não é constante, essa varia com relação ao deslocamento, e, portanto não se utiliza diretamente a expressão do produto da força e do deslocamento, e como normalmente ainda não estudaram integração, utiliza-se a forma geométrica para se calcular.

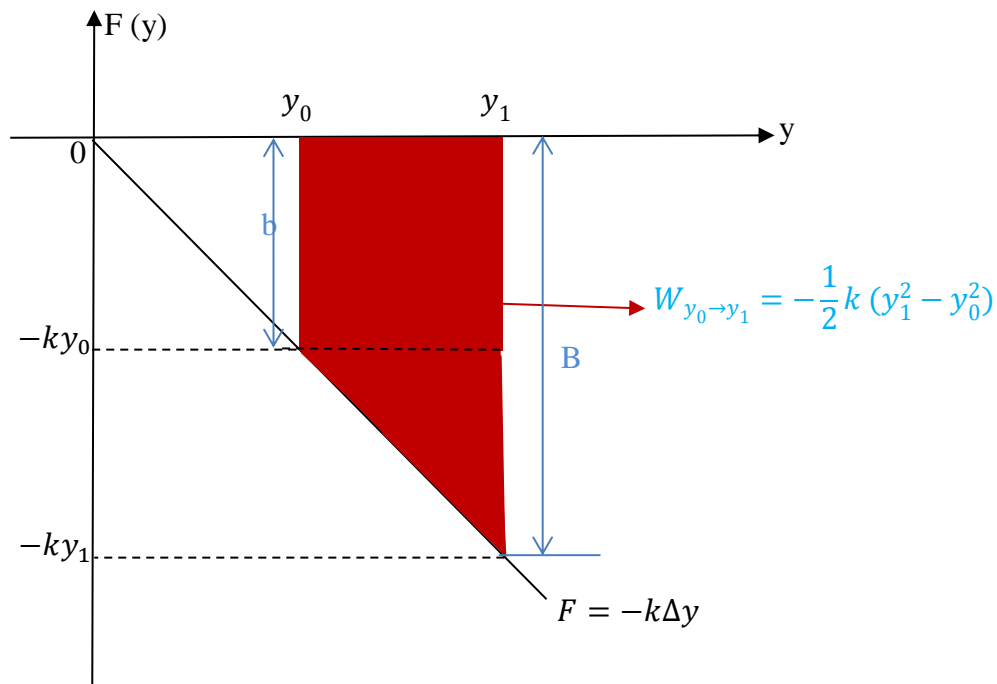


Figura 1.7 - Representação esquemática da força exercida pela mola em função da sua distensão. Nota-se que o trabalho realizado por essa força é representado pela área pintada na figura. FONTE: figura adaptada da referência Nussenzveig (2002).

Calculando a área pintada na Figura 1.7, que é dada pela área do trapézio:

$$A = \frac{h(B + b)}{2} = (y_1 - y_0) \frac{1}{2} (-ky_0 - ky_1) = -\frac{k}{2} (y_1 - y_0)(y_1 + y_0) \quad [1.25a]$$

$$A = -\frac{1}{2}k(y_1^2 - y_0^2) = W_{y_0 \to y_1}. \quad [1.25b]$$

Como já mencionado, o trabalho realizado pela força sobre a mola é negativo quando $y_0^2 < y_1^2$ a mola sofre uma distensão. Em contrapartida, o trabalho será positivo quando $y_0^2 > y_1^2$ a mola for comprimida.

Assim, vimos que o trabalho realizado pela força elástica (força da mola) depende apenas da posição inicial e final. As forças que possuem essa característica são denominadas de forças conservativas, que é o assunto da próxima seção.

1.5.2 Forças Conservativas

Definimos como força conservativa aquela que depende apenas da posição inicial (i) e final (f), ou seja, não depende do “caminho” realizado. Um exemplo está representado na Figura 1.8, adaptado da referência [Tor13].

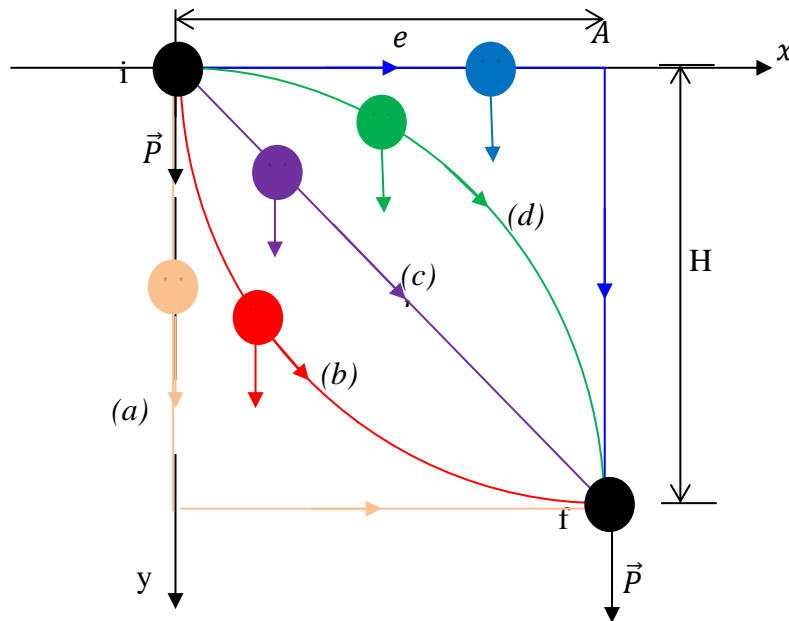


Figura 1.8 - Desenho esquemático ilustrando uma massa m que sai do ponto i até f , e várias das trajetórias que o mesmo possa percorrer. FONTE: figura adaptada da referência [Tor13].

O trabalho realizado pela força peso nas trajetórias (a), (b), (c), (d) e (e), supondo $H = A = 4\text{m}$, e considerando a Equação [1.22] são dadas por:

- Trajeto (a): $W_{i \rightarrow f} = F d \cos \theta = mg (4) \cos 0^\circ + mg (4) \cos 90^\circ = 4 mg + 0 = 4mg$;
- Trajeto (b): $W_{i \rightarrow f} = \int_i^f mg dy = mgH = 4 mg$;
- Trajeto (c): $W_{i \rightarrow f} = F d \cos \theta = mg (4) \cos \theta = 2\sqrt{2} mg \cos 45^\circ = 4 mg$;
- Trajeto (d): $W_{i \rightarrow f} = \int_i^f mg dy = mgH = 4 mg$;
- Trajeto (e): $W_{i \rightarrow f} = F d \cos \theta = mg (4) \cos 90^\circ + mg (4) \cos 0^\circ = 4 mg$.

Logo, o trabalho realizado pela força peso para ir do ponto inicial ao final, independe da trajetória, e será sempre $W_{i \rightarrow f} = mgH$, conforme o exemplo que considera $H = 4$.

A força elástica (no caso, a força da mola) é outra força do tipo conservativa. Em contrapartida, a força de atrito é um exemplo de força não conservativa, visto que essa dissipa, por exemplo, em forma de energia térmica. [Hall11]

Estas definições são importantes, uma vez que podemos observar o trabalho realizado por forças de diferentes naturezas sobre um determinado corpo, à medida que esta se desloca ao longo de uma trajetória e retorna ao ponto de origem.

Outra condição sobre o trabalho e as forças conservativas, é o trabalho total realizado por uma força em um percurso fechado ser nulo. No caso do exemplo da Figura 1.8, temos que por qualquer uma das trajetórias, o trabalho realizado pela força peso para ir de i ao ponto f é igual a $W_{i \rightarrow f} = mgH$, e para ir do ponto f para o ponto i , é dado por $W_{f \rightarrow i} = -m g H$, tal que o trabalho total será igual a zero.

Vejamos mais dois exemplos (Figura 1.8), sendo um deles (a) o sistema massa-mola relacionada à força elástica e (b) o pêndulo simples, outra atuação somente da força gravitacional.

Em ambas as situações um corpo de massa m , retorna ao seu ponto inicial após um deslocamento $y = \pm d$ e $y = \pm A$ respectivamente, e neste caso temos um trabalho total nulo. Isso desprezando o atrito com o ar durante o tempo de observação. Após determinado momento começa a atuar a força de atrito e o trabalho total é não nulo.

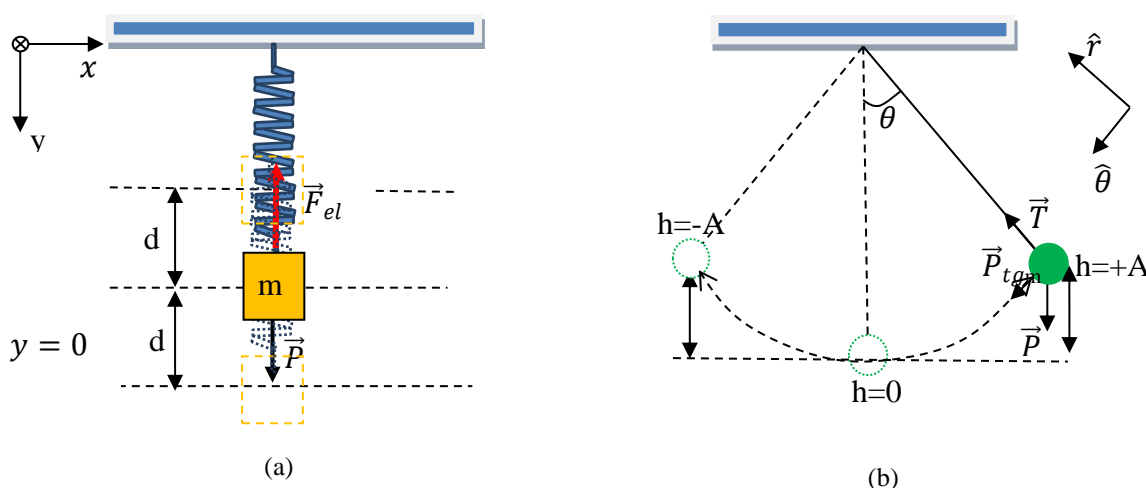


Figura 1.9 - Figuras esquemáticas (a) sistema massa mola e (b) pêndulo simples. Em ambos os casos oscilam em relação ao seu ponto de equilíbrio ($y=0$ e $h=0$, de $y = \pm d$ e $y = \pm A$) respectivamente para cada caso). No caso (a) por meio de duas forças: força peso (\vec{P}) do bloco de massa m e da força elástica/força da mola ($\vec{F}_{el} = \vec{F}_m$) e em (b) pela atuação da componente tangencial (\vec{P}_{tg}) da força peso da esfera de massa m , após esta ser liberada de uma altura h . FONTE: o autor.

- Sistema Massa-Mola

Analisando a Figura 1.9(a) com mais detalhes (Figura 1.10), iniciando com uma compressão²³, tem-se:

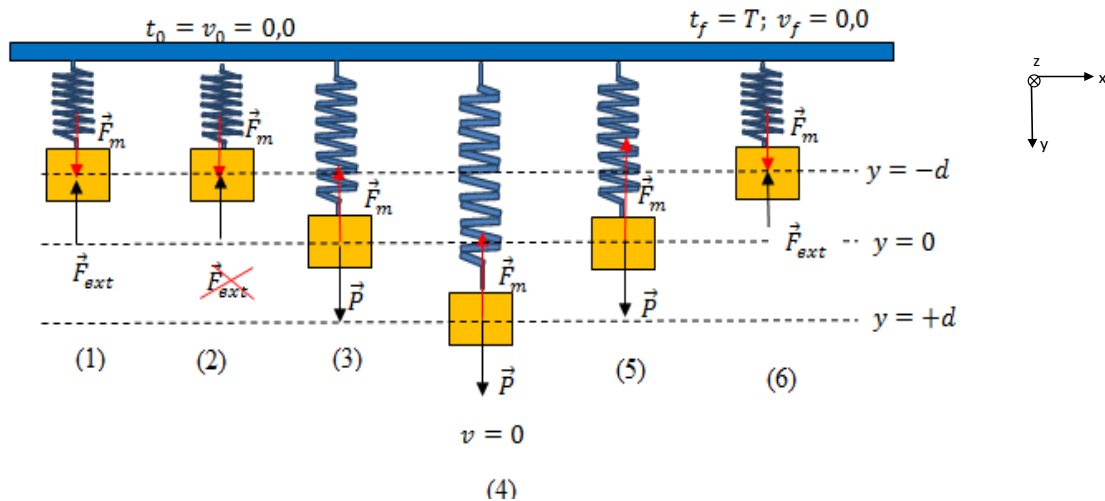


Figura 1.10 - Figura esquemática indicando as etapas de um ciclo completo da oscilação do sistema massa-mola: (1) atuação de uma força externa (\vec{F}_{ext}) em oposição a força da mola (\vec{F}_m); (2) retira-se a força externa (\vec{F}_{ext}); (3) a mola se desloca para baixo pela atuação da força peso (\vec{P}) e da força da mola (\vec{F}_m); (4) atinge a posição $+d$ (amplitude máxima) e inicia seu processo de retorno (5) em que a força da mola e o deslocamento mudam de sentido, passa pelo ponto de equilíbrio, até atingir (6) a posição inicial ($y = -d$), completando 1 período (T). FONTE: figura adaptada da referência [Hall11].

Considerando as 4 etapas em que a mola realiza trabalho ((3) a (6)), na sequência da Figura 1.10, e utilizando a Equação [1.22]:

- Retira-se o agente externo ($t = 0$ s; $v_0 = 0,0$ cm/s) fazendo com que a mola comece a realizar trabalho sobre o bloco. Este se deslocando passando por $y = 0$;

$$W_{-d \rightarrow 0} = \int_{-d}^0 F_m dy = \int_{-d}^0 (ky) dy = + \frac{1}{2} k (d^2); \quad [1.26]$$

²³ Observando o perfil da Figura 1.10, em um período (T), representamos o processo de ida e volta da massa, é uma função cosseno ($\cos(\omega t)$), como informada na solução (Equação [1.20]) do método dinâmico da constante elástica.

- O bloco continua movimentando para baixo sob ação da força peso e da mola que a empurra devido à compressão sofrida inicialmente, até atingir a posição $y = +d$, posição máxima ($v = 0$); muda o sentido do deslocamento para cima:

$$W_{0 \rightarrow +d} = \int_0^{+d} F_m dy = \int_0^{+d} (-ky) dy = -\frac{1}{2} k (d^2); \quad [1.27]$$

- A força exercida pela mola muda de sentido, puxando o corpo para cima, oposta a força peso e, passando pela posição de equilíbrio ($y = 0$).

$$W_{+d \rightarrow 0} = \int_{+d}^0 F_m dy = \int_{+d}^0 (ky) dy = +\frac{1}{2} k (d^2); \quad [1.28]$$

- E continua o movimento até retornar à posição $y = -d$.

$$W_{0 \rightarrow -d} = \int_0^{-d} F_m dy = \int_0^{-d} (ky) dy = -\frac{1}{2} k (d^2). \quad [1.29]$$

O bloco movimentando-se de $y = -d$ até $y = +d$ em movimento oscilatório e o trabalho da mola para voltar até seu ponto de partida é representado, matematicamente, por:

$$W_{-d \rightarrow 0} + W_{0 \rightarrow d} + W_{d \rightarrow 0} + W_{0 \rightarrow -d} = W_T = 0. \quad [1.30]$$

Portanto, quando o bloco retorna a sua posição de origem, somando-se as quatro contribuições, no ciclo completo, o trabalho total realizado pela mola será igual a 0 (zero). Esta é uma das características que indica que a força elástica é uma força conservativa.

Outro processo semelhante é o de um pêndulo simples (Figura 1.9 (b)), que envolve somente a força gravitacional.

- **Pêndulo Simples**

O trabalho realizado pela força peso, para levar a massa de sua posição inicial até a final, é nulo (completando 1 T); observando na Figura 1.9 (b), temos uma massa que oscila do ponto $+A$ até o ponto $-A$, passando pelo ponto de equilíbrio 0 . Sua trajetória é um arco de curva. Desprezando a massa do fio, temos que a atuação da componente tangencial da força peso (\vec{P}): $P_{tg} = mg \operatorname{sen} \theta$, ao liberar a massa está a favor do deslocamento. O trabalho realizado por essa componente da força peso é representado por:

$$W = +(mg \operatorname{sen} \theta)A. \quad [1.31]$$

Ao atingir a amplitude máxima $-A$, irá retornar em sentido oposto:

$$W = -(mg \operatorname{sen} \theta)A. \quad [1.32]$$

Portanto, o trabalho total realizado pela força gravitacional sobre a massa em seu movimento de ida e volta é nulo (1 T), ou seja, somando as Equações [1.31] e [1.32] temos: $W_T = 0$.

De forma geral, nominamos **trabalho motor**, quando $W > 0$ e de **trabalho resistente** quando $W < 0$.

Assim, vemos que o trabalho total realizado por uma força conservativa é nula, bem como independe da trajetória (caminho percorrido em um percurso fechado) de ir de sua posição inicial até sua posição final e retornar a sua posição inicial, dependendo somente da posição inicial e final. Vejamos o que ocorre para uma força não conservativa, em termos do trabalho total realizado por esta força ser ou não nulo.

1.5.3 Força de atrito, uma força não conservativa

O físico francês Charles Augustin Coulomb (1736-1806) determinou experimentalmente as leis do atrito entre as superfícies de dois corpos, chegando à conclusão de que a intensidade da força de atrito estática máxima $\vec{f}_{a\text{máx}}$ é

diretamente proporcional à intensidade da força normal \vec{N} entre os corpos em contato [Guim14]. Matematicamente, podemos escrever tal definição conforme [1.25]:

$$\vec{f}_{a\text{máx}} = \mu \vec{N}. \quad [1.25]$$

Na Equação [1.25], μ a constante de proporcionalidade entre as grandezas envolvidas, é chamada de coeficiente de atrito estático ou cinético entre as superfícies. A força de atrito²⁴ atua sempre em sentido oposto ao movimento de um corpo²⁵, assim, o trabalho realizado por ela é sempre negativo ($W < 0$).

Na Figura 1.11 é possível identificar a atuação da força de atrito (\vec{f}_a) – além de outras forças já conhecidas, tais como, a força normal \vec{N} , a força peso \vec{P} e a força \vec{F} que age no intuito de fazer com que o bloco apresentado na figura adquira movimento. É válido observar que \vec{F} e \vec{f}_a possuem sentidos opostos e, conseqüentemente, tem-se um trabalho total realizado pela força de atrito não nulo.

Podemos, ainda, afirmar que o trabalho realizado pela força de atrito para ir de A até B , é dado por:

$$W_{A \rightarrow B} = - \int_A^B \mu_c N dx = -\mu_c N (B - A). \quad [1.26]$$

E, o trabalho realizado pelo mesmo para retornar de B até A :

$$W_{B \rightarrow A} = \int_B^A \mu_c N dx = \mu_c N (A - B) = -W_{A \rightarrow B}. \quad [1.27]$$

De forma que somando as Equações [1.33] e [1.34], o trabalho total é igual a:

$$W_T = W_{A \rightarrow B} + W_{B \rightarrow A} = 2 W_{A \rightarrow B} = -2\mu_c N(\Delta x) \neq 0 \quad [1.28]$$

²⁴Atuação de força de atrito pode ser simulada no site PHET: <https://phet.colorado.edu/sims/html/forces-and-motion-basics/latest/forces-and-motion-basics_pt_BR.html>.

²⁵ Tomando o cuidado, que uma pessoa subindo em uma rampa, possui uma força de atrito apontada no sentido do deslocamento, evitando que o mesmo não escorregue, e, outra oposta ao deslocamento de forma que ele suba na rampa.

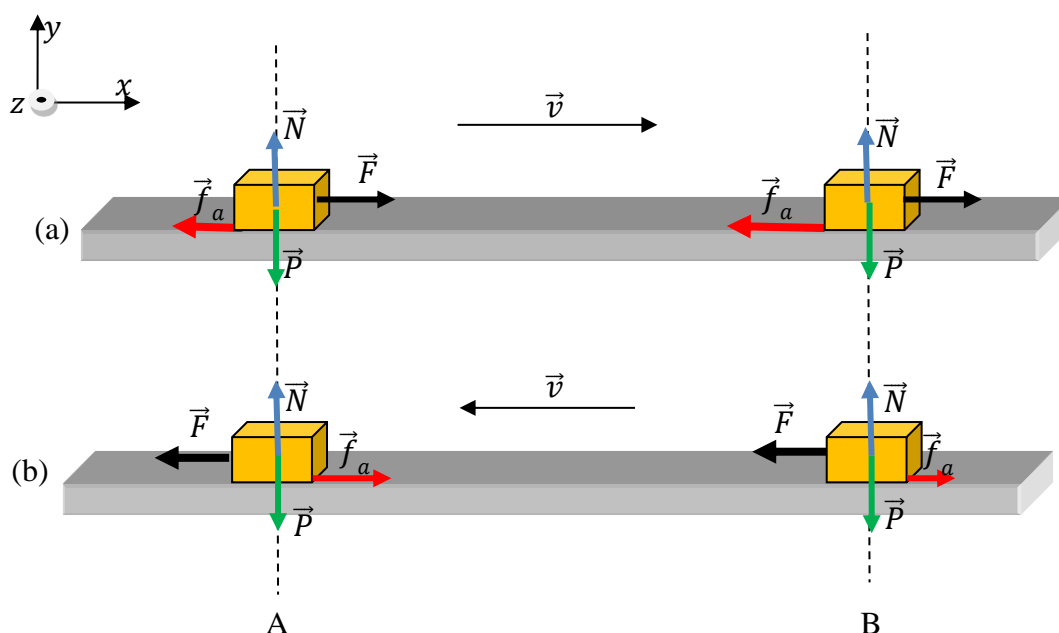


Figura 1.11 - Representação das forças que atuam sobre um bloco ao entrar em movimento pela ação de uma força \vec{F} e atuação da força de atrito \vec{f}_a no caso cinético (superfície não lisa), (a) para ir de A até B e em (b) para retornar de B até A. As demais forças são: \vec{N} a força normal e \vec{P} a força peso estão em equilíbrio. Indicado ainda a velocidade (\vec{v}) do bloco e seu sentido de movimento. FONTE: o autor.

Diante do exposto, podemos afirmar que a força elástica e a força gravitacional (próximo à superfície da Terra – força peso) são conservativas, pois: mostradas em termos do trabalho total realizado por elas em um percurso fechado ser nulo, e independem da trajetória (dependendo somente dos pontos inicial e final). Com relação à força de atrito, esta é não conservativa, mostrada por meio do trabalho total realizado em um percurso fechado, e complementado conforme afirmado por Halliday: “[...]. Se o trabalho total para o percurso completo não é nulo, diz-se que a força é não-conservativa.” (Halliday et al, 2011, p. 290). [Hall11]

As forças não conservativas também são conhecidas por forças dissipativas, e dentro do conceito de energia, a seguir, apresenta-se o motivo da atribuição desse termo.

1.5.4 Energia Mecânica

Inicialmente podemos considerar que o termo energia pode tomar diversos significados de acordo com o contexto em que estiver sendo empregado. É comum ouvirmos: “Nossa, fulano tem muita energia!”, “Esse alimento vai te dar muita

energia!”, “*Precisa de muita energia para levantar esse carro!*”. Ideias como essas são comuns em nosso cotidiano. Mas, o caráter científico do termo energia deve ser evidenciado.

Nas tentativas de elaborarem modelos para, posteriormente, poderem estudar os fenômenos, cientistas do século XIX observaram que em todos os fenômenos naturais, até então conhecidos, permaneciam como uma grandeza física que se mantinha constante após determinado processo físico ou químico. Essa grandeza foi denominada *energia*. O comportamento da energia inerente aos fenômenos naturais respeita à lei de conservação²⁶ de energia, enunciada como: “A energia do Universo é constante; não pode ser criada nem destruída, mas apenas transformada em diversas modalidades”. [Fuk16]

Richard Feynman²⁷ (1918-1988), físico estadunidense do século XX apresentou o seguinte pensamento em relação a esta lei:

“Ainda não sabemos o que é energia. Não sabemos por ser a energia uma coisa “estranha”. A única coisa de que temos certeza e que a natureza nos permite observar é uma realidade, ou, se preferir, uma lei, chamada conservação da energia. Essa lei diz que existe “algo”, uma quantidade que chamamos de energia, que se modifica em forma, mas que a cada momento que a medimos, sempre apresenta o mesmo resultado numérico. É incrível que algo assim aconteça [...] A energia se apresenta de diferentes formas, que podem ser mecânica, calorífica, química, nuclear, mássica. Apresentando-se sempre de formas variadas, com várias roupagens, mas sempre – e até hoje não encontramos exceção- sempre conserva. Algo realmente intrigante”. (Ciências. O que é Energia? Disponível em: <http://www.conteduc.dcc.ufba.br/index.php?option=com_content&view=article&id=59&Itemid=555>, Acesso em 07/12/2018).

Como exposto, Feynman nos tenta mostrar que o conceito de energia é abstrato, de difícil entendimento, o que pode levar as pessoas a definir esse termo de maneira equivocada [Fuk16]. No aspecto físico, pode-se entender energia como característica de um corpo ou de um sistema de corpos, relacionando-os com a sua capacidade em produzir movimento.

²⁶Uma das leis de conservação mais famosas é a Lei de conservação de massas. Conforme postulado pelo químico francês Antoine Laurent Lavoisier em 1785, denominado de Lei de Lavoisier informa: “Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”. Portanto, algo que se conserva, depende somente de seu estado final que deve ser igual ao seu estado inicial.

²⁷Feynman conquistou em 1965, o Prêmio Nobel de Física, por resolver com sucesso problemas relacionados à teoria da eletrodinâmica quântica.

Existem muitos tipos de energia. Considera-se uma forma especial: a energia cinética, ou seja, a energia associada ao movimento de um corpo. Esta energia também pode ser armazenada em um sistema em termos de energia potencial, ou ser transformada em outras formas de energia, tais como, química, elétrica, térmica, entre outras. A seguir, apresentam-se os tipos de energia que iremos utilizar no presente trabalho: a Energia Mecânica que é composta da Energia Cinética e Energia Potencial.

1.5.4.1 Energia Cinética (E_c)

A energia cinética, E_c , de um corpo é uma grandeza escalar, definida como o *trabalho total que deve ser realizado sobre a partícula/corpo²⁸ para trazê-la de um estado de repouso até uma velocidade \vec{v} .*

Isso pode ser demonstrado partindo da equação do trabalho (Eq. [1.22]), considerando de forma unidimensional para a situação física apresentada na Figura 1.10 (de (a) até (d)) além da equação fundamental da dinâmica²⁹:

$$W = \int F dy \quad [1.29]$$

A força que provoca o movimento é dada por: $F = m \frac{d|\vec{v}|}{dt} = m \frac{dv}{dt}$.

Sendo essa a segunda lei de Newton para o movimento. Que ao ser substituída na expressão do trabalho (Eq. [1.21]) fica escrita na forma:

$$W = \int m \frac{dv}{dt} dy. \quad [1.30]$$

²⁸Como não estamos considerando as dimensões do corpo, e todas as forças atuam no centro de massa do mesmo, o corpo pode ser considerado como uma partícula.

²⁹ Esta mesma equação pode ser obtida considerando a cinemática (equação de Torricelli $v^2 = v_0^2 + 2 a d$) e dinâmica ($F = ma$). Logo: $W = F d \cos\theta$, em que, $\theta = 0^\circ$, força e deslocamento estão em um mesmo sentido: $W = Fd = m a d = \frac{m(v^2 - v_0^2)}{2} = \Delta E_c$.

Fazendo duas considerações nessa expressão: de que a massa seja constante e substituindo $\frac{dy}{dt}$ pela velocidade v , ou seja, realizando uma mudança de variável, a Equação [1.30] se torna:

$$W = m \int_{v_0}^v v \, dv. \quad [1.31]$$

Integrando a Equação [1.31], resulta em:

$$W = \frac{1}{2} m (v^2 - v_0^2) = \Delta E_c. \quad [1.39]$$

A Equação [1.39] é conhecida como o **Teorema Trabalho-Energia Cinética**, em que a quantidade $\frac{1}{2} m v^2$ é definida como energia cinética E_c , conforme apresentado na Equação [1.40]:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2. \quad [1.40]$$

Independente qual seja a direção e sentido da velocidade \vec{v} , a energia cinética é sempre positiva. Lembrando que a energia é uma quantidade escalar, no caso a massa m é um escalar, bem como o termo da velocidade ao quadrado v^2 . Embora a energia cinética seja sempre positiva, a sua variação ΔE_c (Equação [1.29]) poderá ser positiva, negativa ou nula.

A próxima energia a ser apresentada é a energia potencial; veremos que essa é um tipo de energia que está associada às forças conservativas (apresentada na seção 1.5.2).

1.5.4.2 Energia Potencial (E_p)

A energia potencial pode ser definida como um tipo de energia que pode ser armazenada em determinado corpo, podendo ser transformada em trabalho. Entre os tipos de energia conhecidos, daremos ênfase à energia potencial gravitacional e

energia potencial elástica. Destacamos que toda a energia potencial é produzida pela aplicação de uma força conservativa, conforme visto na seção 1.5.2.

- Vejamos o caso do trabalho realizado por uma mola apresentado na Equação [1.24].

A quantidade $\frac{1}{2} k y^2$ é definida como a energia potencial elástica (no caso da mola). Assim, temos:

$$E_{Pel} = \frac{1}{2} k y^2 \quad [1.41]$$

O trabalho realizado pela mola é dado por:

$$W_m = - \Delta E_p. \quad [1.42]$$

- Já o caso de uma massa abandonada verticalmente de uma altura (h_0) até um ponto mais baixo (h), em que somente atua a força peso \vec{P} (Figura 1.12).

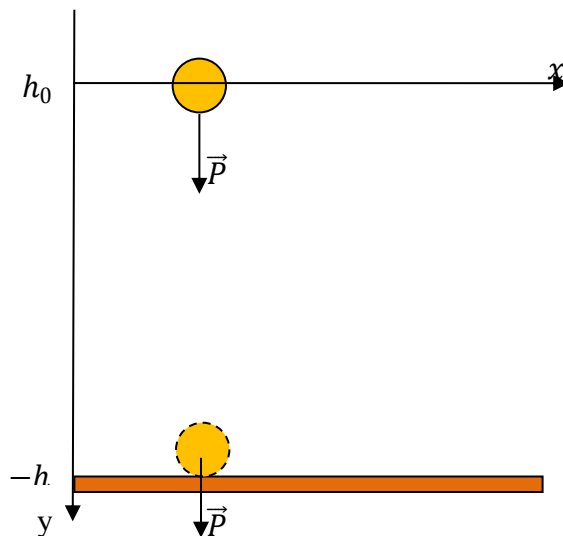


Figura 1.12 - Figura ilustrativa indicando o referencial, utilizando o sistema cartesiano - plano (x,y), de liberação de um corpo de massa m , de uma altura h , sendo a única força atuando durante o movimento ser a força peso (\vec{P}). FONTE: o autor.

Para este corpo somente a coordenada y (considerada a vertical) é quem definirá como se arranjará esse sistema. Leva-se em consideração tal informação, pois é necessário admitir casos em que analisamos o trabalho W sobre apenas um objeto do sistema.

Como afirmado por Halliday, 2011:

A energia potencial E_p é uma energia associada à *configuração* de um sistema. Aqui “configuração” significa como os componentes de um sistema estão dispostos com respeito aos demais (por exemplo, a compressão ou alongamento da mola no sistema bloco-mola; ou a altura da bola no sistema bola-Terra). (Halliday *et al*, 2011, p. 292). [Hall11]

Como a única força atuante é a força peso desprezando as forças dissipativas, o trabalho realizado por essa força é dado por:

$$W = \int_{h_0}^{-h} P \, dy = \int_{h_0}^{-h} mg \, dy = mg \int_{h_0}^{-h} dy = -mg(h - h_0). \quad [1.43]$$

Definindo a quantidade, mgh , como a (energia potencial gravitacional E_{PG}), ou seja, que:

$$E_{PG} = mgh. \quad [1.44]$$

O trabalho será dado por:

$$W = -\Delta E_{PG}. \quad [1.45]$$

Portanto, podemos escrever independente da força conservativa em questão que, a Equação [1.45] nos apresenta, em caráter matemático, o trabalho realizado por uma força em uma dimensão. [Hall11]

$$\Delta E_p = E_p(y_f) - E_p(y_i) = W = - \int_{y_i}^{y_f} F_y \, dy. \quad [1.46]$$

A equação [1.46] permite determinar a diferença de energia potencial ΔE_p entre dois pontos y_i e y_f quando um determinado corpo sofre a ação de uma força $|\vec{F}_y(y)|$. Ao utilizarmos um ponto arbitrário y em relação à referência y_0 , obtemos [1.47].

$$E_p(y) - E_p(y_0) = - \int_{y_0}^y Fy \, dy, \quad [1.47]$$

podemos então escrever uma relação unidimensional entre a força conservativa e a energia potencial:

$$F_y = - \frac{dE_p}{dy}. \quad [1.48]$$

A Equação [1.48] escrita de forma geral³⁰:

$$\vec{F} = - \vec{\nabla} E_p. \quad [1.49]$$

Desta maneira, podemos dizer que a energia potencial é uma energia acumulada em determinado sistema por determinada força conservativa.

Vale frisar que uma vez armazenada, estas energias podem ser transformadas em energia cinética, ou seja, são capazes de produzir movimento. Esse fato pode ser visto matematicamente por meio da junção das Equações [1.39] e [1.42] em que:

$$\Delta E_c = -\Delta E_p \quad [1.50]$$

Definimos a Energia Cinética associada ao movimento do corpo, e a Energia potencial que é a energia acumulada pelo corpo; e, que depende da configuração do sistema. Comentamos ainda nesta seção que uma energia pode se transformar em outra e vice-versa. Vejamos ao que esta transformação nos conduz.

1.5.5 Conservação de Energia Mecânica

Ao combinarmos os conceitos de energia cinética e energia potencial apresentados nas subseções 1.8.1 e 1.8.2, se obtém uma lei denominada *lei de*

³⁰ O termo: $\vec{\nabla}$ é denominado de gradiente. Em coordenadas cartesianas é escrito como derivada parcial em relação à posição de cada variável: x, y, z , indicadas as suas respectivas direções e sentidos: $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$.

conservação da energia mecânica ou *princípio da conservação de energia mecânica*.

O físico Richard Feynman (1918-1988) considera o princípio de conservação de energia exato e sem exceções, ou seja, é uma lei que impera sobre todos os fenômenos da natureza.

Existe um fato, ou se você preferir, uma *lei* que governa todos os fenômenos naturais que são conhecidos até hoje. Não se conhece nenhuma exceção a essa lei – ela é exata até onde sabemos. A lei é chamada de *conservação da energia*. Nela enunciase que existe uma certa quantidade, que chamamos de energia, que não muda nas múltiplas modificações pelas quais a natureza passa. Essa é uma ideia muito abstrata, por que é um princípio matemático; ela diz que existe uma quantidade numérica que não muda quando algo acontece. Não é a descrição de um mecanismo ou algo concreto; é apenas um estranho fato de que podemos calcular algum número e, quando terminamos de observar a natureza fazer seus truques e calculamos o número novamente, ele é o mesmo (FEYNMAN, 2008, p.4-1). [*Feyn08*].

Concluimos por meio da Equação [1.50], que um aumento na energia cinética equivale à uma redução na energia potencial do sistema conservativo massa-mola, ou seja: $\Delta E_c = -\Delta E_p$.

Para um sistema constituído por muitos corpos interagindo entre si por meio de forças conservativas (elástica da mola, gravitacional, elétrica, dentre outras) podemos concluir que a mudança total na energia cinética de todos os corpos constituintes do sistema é igual em intensidade, porém oposta em sinal, à mudança total ocorrida na energia potencial do sistema. Essa definição está presente na equação [1.51].

$$\Delta E_{c_{total}} = -\Delta E_{p_{total}}. \quad [1.51]$$

De maneira a ter mais utilidade, podemos reescrever a Eq. [1.51] conforme disposto na Eq. [1.52]:

$$\Delta E_{c_{total}} + \Delta E_{p_{total}} = 0. \quad [1.52]$$

A expressão matemática [1.52] afirma que, quando atuam apenas forças conservativas em um sistema, qualquer mudança na energia total deste, deverá ser

equilibrada por uma mudança de igual valor e sinal oposto na sua energia potencial, visando à nulidade da soma de tais mudanças. Definindo o somatório: $\Delta E_{c_{total}} + \Delta E_{p_{total}}$ como variação a energia mecânica total $\Delta E_{m_{total}}$, a Equação [1.52] fica representada na forma:

$$\Delta(E_{c_{total}} + E_{p_{total}}) = \Delta E_{m_{total}} = 0. \quad [1.53]$$

E, da Equação [1.53] a quantidade $(E_c + E_p)$ denominada de energia mecânica (E_m) foi definida como:

$$E_c + E_p = E_m. \quad [1.54]$$

Caso haja uma variação em qualquer tipo de energia (cinética ou potencial) a variação da energia mecânica deverá permanecer constante. Condição válida somente na ausência de forças dissipativas.

A Equação [1.53], escrita na forma: $E_{m_{total_f}} - E_{m_{total_i}} = 0$, tal que:

$$E_{m_{total_i}} = E_{m_{total_f}}, \quad [1.55]$$

em que os índices i e f são as situações inicial e final da energia mecânica total do sistema, respectivamente, demonstrando que estas são iguais. Representamos matematicamente na Equação [1.55] a lei da conservação da energia mecânica que é definida como:

Em um sistema isolado em que atuem apenas forças conservativas, a energia mecânica total permanece constante.

Uma vez agindo sobre um corpo em um sistema, as forças podem transformar energia potencial em cinética ou vice-versa. Além disso, pode-se converter um tipo de energia potencial em outro tipo de energia potencial, mas a energia mecânica total deverá ser constante. O atrito (neste caso apresentado como uma força não-conservativa, por dissipar a energia potencial, ou seja, realizar trabalho negativo) caso passe a agir no sistema faz com que E_{total} não seja mais constante.

Nussenzveig (2002) afirma não conhecer força não-conservativa que viole o Princípio da Cons. de Energia, quando consideramos um sistema isolado. Além disso, o autor relata a importância do princípio de conservação de energia total de um sistema:

Nesse sentido mais amplo de conservação de energia *total*, podemos dizer que não se conhece nenhuma força não conservativa, ou seja, não foi descoberto até hoje nenhum fenômeno em que seja violado o princípio de conservação da energia total de um sistema isolado. Esta é uma das razões que fazem deste princípio um dos mais importantes da física. À medida que ampliamos nosso conhecimento dos fenômenos físicos, vemos surgir ampliações sucessivas do conceito de energia, inclusive, ao penetrarmos no domínio relativístico, com a célebre descoberta de Einstein da relação entre massa e energia. (Nussenzveig, 2002, p. 142). [Nus02]

Num sentido mais restrito do princípio de conservação de energia mecânica, consideremos o sistema massa-mola apresentado como principal proposta do PE desta dissertação de mestrado. Ao determinarmos a constante elástica da mola k :

- Método estático: a transformação está entre energia potencial gravitacional em energia potencial elástica e vice versa;
- Método dinâmico: provoca-se oscilações a um sistema constituído por energia potencial elástica (E_{PE}) presente na força que a mola exerce contra o movimento da massa e a potencial gravitacional (E_{PG}) da massa por estar posicionada a uma altura h da posição de alongamento máximo da mola. E a conversão dessas energias em energia cinética E_c e vice-versa.

De modo que, a soma das energia sem ambas as situações têm como energias inerentes a cada sistema nulas.

1.5.6 Aplicações da Lei de Conservação de Energia Mecânica

Nesta seção apresentam-se três aplicações da Lei da Conservação de Energia Mecânica. As duas primeiras utilizando as equações obtidas até o momento sobre energia: determinação da expressão da constante elástica para os métodos:

estático e dinâmico; e a terceira aplicação de forma mais lúdica que trata da “lata mágica”.

O objetivo desta seção é relacionar os dois conceitos físicos desenvolvidos: Lei de Hooke e Conservação de Energia.

1.5.6.1 Constante Elástica – Método Estático

Nesta seção obter-se-á a Equação [1.12] por meio da lei de conservação de energia mecânica. Essa lei informa que a energia mecânica total inicial é igual à energia mecânica total final. No sistema massa-mola da Figura 1.2 (a), e readequado na Figura 1.13,

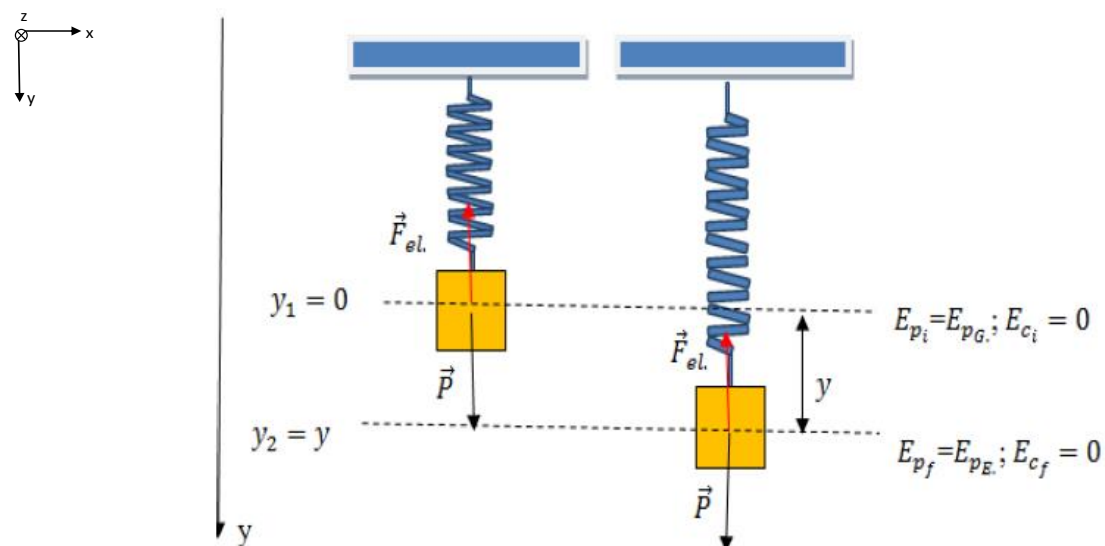


Figura 1.13 - Figura esquemática de um sistema massa-mola para a obtenção da constante elástica para o método estático. As forças que atuam no sistema provocando um deslocamento Δy , são a força elástica \vec{F}_{el} , e a força peso \vec{P} , em equilíbrio estático. Os índices i e f que acompanham as representações de energia cinética e potencial simbolizam os estados inicial e final, respectivamente. FONTE: o autor.

fica escrita na forma:

$$E_{m_i} = E_{m_f}$$

$$E_{p_i} + E_{c_i} = E_{p_f} + E_{c_f} . \quad [1.56]$$

Para isso, consideram-se as forças dissipativas desprezíveis, e a atuação somente das forças conservativas, no caso, a força peso e a força elástica (força da mola).

Abrindo a Equação [1.49], em coordenadas cartesianas:

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}E_p = \left(-\frac{\partial E_p}{\partial x}\hat{i}\right) + \left(-\frac{\partial E_p}{\partial y}\hat{j}\right) + \left(-\frac{\partial E_p}{\partial z}\hat{k}\right) = F_x\hat{i} + F_y\hat{j} + F_z\hat{k} \quad [1.57]$$

Considerando a direção y , sentido para baixo indicado pelo vetor unitário \hat{j} , a energia potencial pode ser escrita em termos da força da seguinte forma:

$$E_p = -\int F_y dy. \quad [1.58]$$

Utilizando a Equação [1.58] obtêm-se que a energia potencial gravitacional é dada por $E_{PG} = -mg\Delta y$ e a energia potencial elástica, por $E_{PE} = \frac{-k(\Delta y)^2}{2}$; conforme apresentado nas Equações [1.41] e [1.44]. Já a energia cinética (Equação [1.40]) seria dada por $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, mas como o sistema é estático $v = 0$, tal que a $E_c = 0$.

Por fim, substituindo as equações das energias potenciais e cinética na Equação [1.56]:

$$-mg\Delta y + 0 = -k(\Delta y)^2 + 0 \quad [1.59]$$

Isolando o termo da constante Elástica na Equação [1.59] obtêm-se:

$$k = \frac{mg}{\Delta y} \quad [1.60]$$

Logo, obtivemos a Equação [1.60] que é idêntica à Equação [1.12], obtida na subseção 1.4.2.1, via Leis de Newton.

Na sequência, vejamos como obter a expressão da constante elástica para o caso dinâmico a partir da lei de conservação de energia mecânica.

1.5.6.2 Constante Elástica – Método Dinâmico

Na Figura 1.14 é apresentado o sistema massa-mola, para obter a Equação [1.20] que é a expressão da constante elástica para o caso dinâmico, por meio da Lei de Conservação de Energia Mecânica.

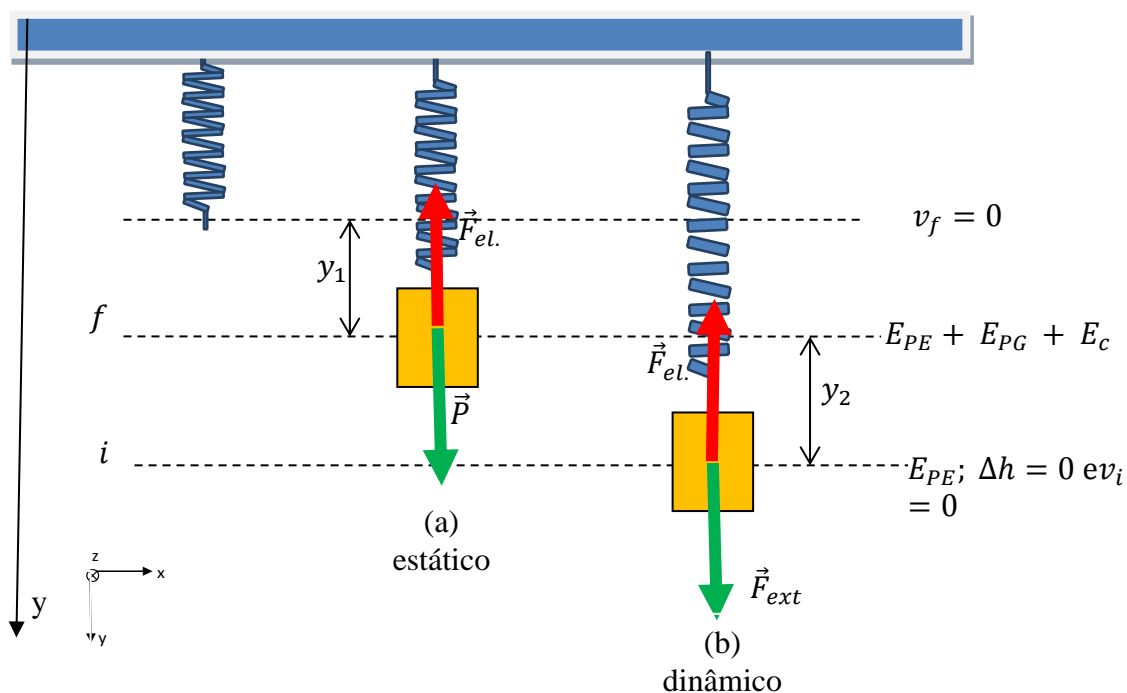


Figura 1.14 - Figura esquemática de um sistema massa-mola para obtenção da constante elástica do método dinâmico via lei da conservação de energia mecânica. As forças que atuam no sistema provocando um deslocamento $y_1 + y_2$ são: a força elástica ($\vec{F}_{el.}$) e a força peso \vec{P} , em torno de um novo ponto de equilíbrio (f). FONTE: o autor.

Diante do exposto na Figura 1.14, considera-se que as forças dissipativas são desprezíveis no tempo de oscilação, atuando somente as forças conservativas, que são a força peso e a força elástica. O corpo é liberado na posição inicial (i) e a nova posição de equilíbrio é a posição (f). Primeiramente será obtida a velocidade do corpo nesse ponto. Posteriormente, utiliza-se o conhecimento da cinemática para obter uma equação diferencial ordinária (EDO) de segunda ordem, cuja solução já foi vista (Equação [1.17]).

Pela Lei de conservação de energia mecânica (Eq. [1.55]):

$$E_{m_i} = E_{m_f} .$$

Escrita em termos das energias potenciais: gravitacional (E_{PG}) e elástica (E_{PE}), e cinética (E_C): iniciais (i), e finais (f), tem-se que:

$$E_{PG_i} + E_{PE_i} + E_{C_i} = E_{PG_f} + E_{PE_f} + E_{C_f} \quad [1.61]$$

Considerando a posição em i , dada por $y (= y_1 + y_2)$, as energias nas posições inicial e final são respectivamente:

$$0 + \frac{1}{2}k (y_1 + y_2)^2 + 0 = \frac{1}{2}k y_1^2 + mg y_2 + \frac{mv^2}{2} \quad [1.62]$$

Simplificando os termos iguais em ambos os lados da igualdade, obtém-se:

$$ky_1y_2 + \frac{ky_2^2}{2} = mgy_2 + \frac{mv^2}{2}, \quad [1.63]$$

Como da Equação [1.60], $k = \frac{mg}{y_1}$, ponto de equilíbrio estático (no caso considerou-se $\Delta y = y_1$), na Equação [1.63] resta que:

$$\frac{ky_2^2}{2} = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow ky_2^2 = mv^2. \quad [1.64]$$

Considerando a mola em oscilação, e que a velocidade da massa possa ser escrita em termos da aceleração como: $v^2 = -2a \frac{(y_1+y_2)}{2} = -a (y_1 + y_2) = -ay_2$, visto que em y_1 a aceleração é nula, a Equação [1.64] é reescrita da seguinte forma:

$$ky_2^2 = -may_2 \Rightarrow ky_2 = -m a = -m \frac{d^2y_2}{dt^2}. \quad [1.65]$$

Sendo esta a equação diferencial ordinária (EDO) de segunda ordem, conforme nos apresenta a Equação [1.15], cuja solução é dada pela Equação [1.17], e satisfeita para $\omega^2 = \frac{k}{m}$. Lembrando que $\omega = \frac{2\pi}{T}$, recaímos na mesma expressão obtida via segunda lei de Newton (Equação [1.20]):

$$k = 4\pi^2 \frac{m}{T^2} \quad [1.66]$$

Retornando ao caso tratado na seção 1.4.1, ao se considerar o caso dinâmico de duas molas em série ou em paralelo (Figura 1.15), o resultado obtido por meio da Equação [1.66] é referente a constante elástica equivalente seja em série ou em paralelo, visto que as molas irão oscilar com o mesmo período T em cada caso.

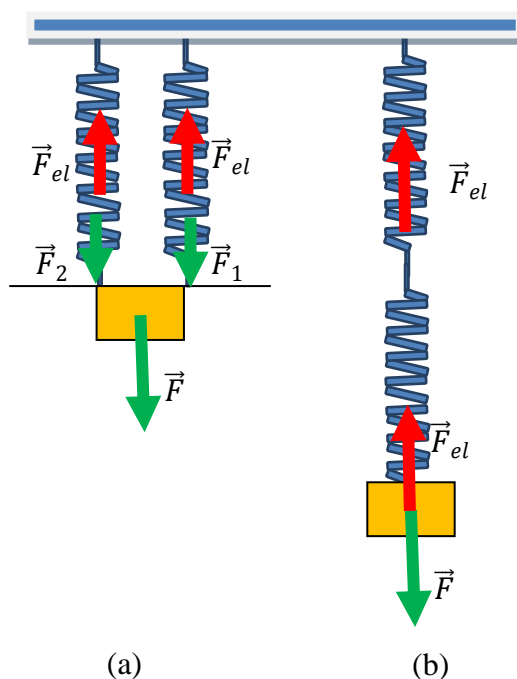


Figura 1.15 - Desenho esquemático ilustrando a ação das forças elásticas \vec{F}_{el} e forças equivalentes \vec{F} em sistemas massa-molas. Em (a), pode-se observar um esquema de duas molas associadas em paralelo e em (b) duas molas associadas em série. Em ambos os casos, as molas oscilam cada qual com o mesmo período T e nestes casos obtemos a constante elástica k equivalente. FONTE: o Autor.

Esclarecendo que caso fosse obter a constante elástica para o caso estático para as configurações ilustradas na Figura 1.15, ficam válidos os raciocínios da seção 1.4.1.

Após termos visto que a lei de conservação de energia mecânica é válida para o sistema massa-mola, desde que sejam desprezadas as forças dissipativas; e, que a energia armazenada na forma potencial se transforma em energia cinética e vice-versa. Apresenta-se a seguir, a teoria envolvida no armazenamento de energia

potencial elástica de outra forma, não mais utilizando mola, mas um elástico torcido, deixando claro que se for substituído por uma mola torcida o resultado também é válido.

1.5.6.3 Armazenamento de Energia Potencial – A “lata energética”³¹

A “lata energética” também conhecida por lata mágica, não somente induz a compreensão do armazenamento de energia potencial elástica, como sua transferência em termos de energia cinética, fazendo com que se mova. Portanto, em um curto período de tempo (em que se consideram as forças dissipativas desprezíveis), ocorre a conservação de energia mecânica, em que a energia potencial elástica armazenada por meio de um impulso na lata, transformando energia cinética em potencial, e a potencial elástica armazenada transforma de volta em cinética, trazendo a “lata” de volta (Figura 1.16).

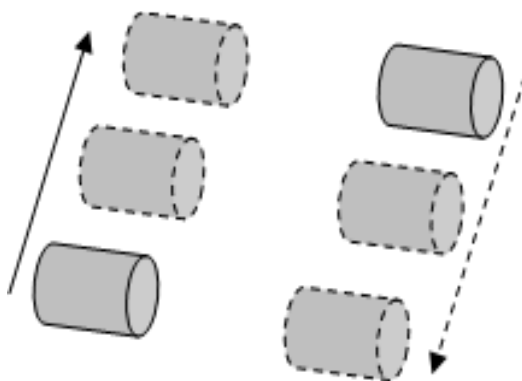


Figura 1.16 - Desenho esquemático mostrando o movimento da “lata” de sair de um ponto e retornar ao mesmo ponto, somente pela atuação de uma força externa dando um impulso na lata. Por um sistema interno não visível, que funciona como um motor movido a “corda”. FONTE: o autor.

O “segredo” desse curioso movimento está no circuito interno, e, utiliza-se um elástico e uma massa presa em sua linha mediana para realização de tal movimento. Nesse sistema as extremidades do elástico estão presas nas laterais (tampa e fundo) da “lata”, utilizando, por exemplo, um palito de madeira. A massa

³¹ Na página da Azeheb há um vídeo mostrando a montagem e o funcionamento: <<https://azeheb.com.br/blog/experimento-de-fisica-lata-magica/>>; ou de forma opcional, um mais elaborado: <https://www.youtube.com/watch?v=c8LB9_E-2w4> acesso em 20/07/2019. Também conhecida como “lata” adestrada: <https://www.youtube.com/watch?v=2_E5f-QxskM> no manual do mundo. Acesso 20/05/2019.

presa pode ser uma pilha ou bateria, ou um parafuso com porca. Ao impulsionar a lata, ocorre a torção no elástico acumulando energia potencial elástica, e quando esse atinge um determinado ponto, pára e essa energia acumulada é transformada em energia cinética, trazendo a lata de volta.

Esse é um dos experimentos utilizados no Produto Educacional (PE) do presente trabalho, em que se exploraram duas formas de atuação, uma somente com o armazenamento de energia potencial elástica, considerando o movimento da lata em uma superfície na horizontal, e a outra forma considerando o armazenamento de energia potencial elástica e a gravitacional, considerando o movimento em um plano inclinado.

Esse sistema é interessante, pois também é possível trabalhar outros conceitos, como por exemplo: calcular a velocidade inicial de impulso, considerando a cinemática. E, caso se considere o atrito, trabalhar o conceito trabalho da força de atrito (W_{fa}) com a variação da energia mecânica ($W_{fa} = \Delta E_m$). Este último talvez mais a nível universitário.

A próxima seção tratará brevemente sobre as Teorias de Aprendizagem utilizadas no presente trabalho.

1.6 Teoria de Aprendizagem e Sequência Didática

Apresenta-se nesta última seção do Capítulo 1, a fundamentação teórica sobre uma das Teorias de Aprendizagem proposta por David Ausubel [Mor99; Mor11 e Mor12] e o formalismo da Sequência Didática seguindo o proposto por Antoni Zabala. [Zab98]

1.6.1 A aprendizagem significativa de D. Ausubel

Sobre o termo *aprendizagem significativa*, temos a seguinte definição proposta por Ausubel:

A aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação ancora-se em conceitos ou preposições relevantes, preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz. [...] O armazenamento de informações no cérebro humano como sendo organizado, formando uma hierarquia conceitual, na qual elementos mais específicos de conhecimento são ligados (e

assimilados) a conceitos mais gerais, mais inclusivos. (MOREIRA, 1999 – p.161). [Mor99]

David Paul Ausubel (1918-2008) fora um dos maiores psicólogos norte americano tendo sofrido desvalorização de seu trabalho por educadores por ter descendência judaica. As ideias behavioristas predominavam até a apresentação de sua teoria em 1963 tendo como principais propostas a mudança de paradigmas e concepções pelos estudantes. [Mor99] Para Ausubel (Figura 1,17) aprender significativamente é ampliar e reconfigurar ideias já existentes na estrutura mental. [Nova Escola – 2016]

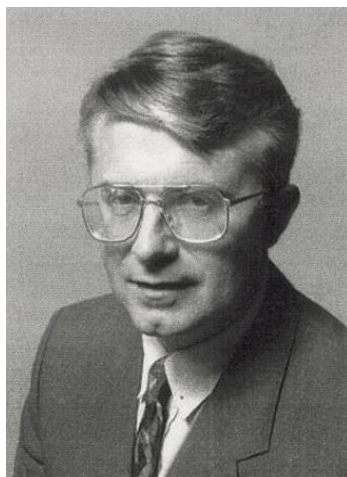


Figura 1.17 - Imagem fotográfica de David Paul Ausubel (1918-2008). Psicólogo Educacional estadunidense. FONTE: <<https://novaescola.org.br/conteudo/262/david-ausubel-e-a-aprendizagem-significativa>>.

Neste trabalho, optamos pela aplicação de questionários prévios e pós-aplicações contendo questões dissertativas e não objetivas (contendo alternativas de múltipla escolha) baseando-se justamente na proposta de uma aprendizagem significativa, uma vez que a análise consistiu no que fora produzido pelos estudantes durante a aplicação da sequência didática (SD) proposta. Desta forma, foi possível realizar uma pesquisa mais minuciosa que levasse em conta a produção escrita dos estudantes, bem como a comparação dos questionários prévios e pós-realizações dos experimentos.

De acordo com Ausubel, as concepções prévias dos estudantes devem ser levadas em consideração como ponto de partida uma vez que estes devem nortear o trabalho desenvolvido e sua reconfiguração na chamada estrutura cognitiva³².

Ainda de acordo com a teoria proposta por Ausubel, um fator isolado de aprendizagem está relacionado com aquilo que o aluno já sabe acerca de um determinado conceito ou conteúdo cabendo ao professor identificar e ensinar de acordo com essas concepções prévias oriundas destes indivíduos. Partindo desta concepção é cabível que:

[...] o uso de *organizadores prévios* sirvam de âncora para a nova aprendizagem e levem ao desenvolvimento de conceitos subsunçores³³ que facilitem a aprendizagem subsequente. O uso de organizadores prévios é uma estratégia proposta por Ausubel para, deliberadamente, manipular a estrutura cognitiva, a fim de facilitar a aprendizagem significativa. Organizadores prévios são materiais introdutórios apresentados antes do material a ser aprendido em si. (Moreira, 1999 – p. 163). [Mor99]

Partindo do exposto sobre aprendizagem significativa e relacionando-se às análises, estas deram-se por meio de abordagens matemática e principalmente física, uma vez que a proposta dessa sequência didática objetiva justamente o ensino de Física em sala de aula.

Conforme análise comparativa dos questionários aplicados antes e após a realização dos experimentos pode-se observar que na grande maioria dos estudantes houve mudanças de concepções a partir dos conhecimentos prévios (pouco ou nenhum, dependendo do conceito/assunto), conforme detalhado no Capítulo 3 desta dissertação.

A par do que Moreira (1999, p. 164) afirma sobre a teoria de Ausubel, esta tem por objetivo “a compreensão genuína de um conceito ou proposição”. Ainda sobre esta evidência em torno da aprendizagem significativa esta compreensão citada “implica a posse de significados claros, precisos, diferenciáveis e intransferíveis” (Moreira, 1999, p. 164). [Mor99]

Como preparar um conteúdo seguindo uma meta, faz parte de uma sequência didática. E, este será o assunto do próximo tópico.

³²Ausubel define como estrutura cognitiva a estrutura hierárquica de conceitos que são representações de experiências sensoriais do indivíduo. (Moreira, 1999 – p.161).

³³Conceitos e proposições estáveis no indivíduo. Em outras palavras, são as “pontes” para novas aprendizagens.

1.6.2 Sequência Didática (SD)

Sequência didática é um termo que se utiliza para ajudar a organizar determinado conteúdo, de forma que torne o mais eficiente um processo de aprendizado. Entre os autores especialistas nesse assunto, está o filósofo, Catalão, Antoni Zabala.

O desenvolvimento da SD deu-se com os estudantes da Primeira Série do Ensino Médio na qual realizaram medidas estáticas e dinâmicas com molas objetivando, inicialmente, a determinação da constante elástica das mesmas a partir de análises gráficas. Posteriormente, se buscou a correlação dos resultados experimentais com o conceito de conservação de energia mecânica.

A utilização de uma sequência didática sobre a Lei de Hooke e a conservação de energia – entre a energia potencial elástica acumulada em molas helicoidais em outra forma de energia, evidencia-se no currículo para o Ensino Médio proposto pelas Diretrizes Curriculares do Estado do Paraná para a componente curricular Física, além da utilização dos materiais, até então “parados” no laboratório do colégio.

A elaboração desta sequência didática esteve em consonância com o descrito por Zabala (1998) que define esta ação como sendo:

[...] um conjunto de atividades ordenadas, estruturadas e articuladas para a realização de certos objetivos educacionais, que têm um princípio e um fim conhecidos tanto pelos professores como pelos alunos ”(ZABALA,1998 - p.18).[Zab98]

Nesta perspectiva, podemos ainda dizer que uma sequência didática pode ser uma sucessão de atividades elaboradas contendo questionamentos, experimentos, aulas expositivas, leituras comentadas, atitudes, procedimentos e ações onde os alunos executam uma determinada atividade mediada pelo professor.

Estas atividades são elaboradas de modo a aprofundar um determinado conteúdo ou tema a ser estudado e desenvolvido. Podem ainda serem utilizadas as mais variadas estratégias didáticas na execução da SD de modo que os estudantes possam aprofundar um determinado tema durante um conjunto³⁴ de aulas propostas.

³⁴Este conjunto de aulas dependerá da quantidade de aulas que o professor considere relevante para desenvolver um determinado tema. Os aprofundamentos, bem como, as estratégias a serem

Nesta concepção, Zabala (1998) afirma que há quatro conteúdos de aprendizagem: factuais, conceituais, procedimentais e atitudinais. O autor afirma que:

Quando se explica de certa maneira, quando se exige um estudo concreto, quando se propõe uma série de conteúdos, quando se pedem determinados exercícios, quando se ordenam atividades de certa maneira, etc, por trás destas decisões se esconde uma ideia sobre como se produzem as aprendizagens” (Zabala 1998 p. 33). [Zab98]

Brasil (2012) elenca que a utilização das SD's são importantes instrumentos na construção do conhecimento. Na organização da SD o professor precisa compreender a necessidade de:

[...] incluir atividades diversas como leitura, pesquisa individual ou coletiva, aula dialogada, produções textuais, aulas práticas, etc., pois a sequência de atividades visa trabalhar um conteúdo específico, um tema ou um gênero textual da exploração inicial até a formação de um conceito, uma ideia, uma elaboração prática, uma produção escrita. (BRASIL, 2012, p-21). [Bra12]

Desta forma, compete ao professor ser o interlocutor e mediador de suas atividades proposta em uma SD. Lembrando que a SD aplicada por intermédio deste Produto Educacional visa à aprendizagem significativa dos estudantes uma vez que levou-se em consideração as concepções prévias dos discentes, bem como novas perspectivas por eles alcançadas no que diz respeito ao desenvolvimento desta temática.

A seguir, apresenta-se o capítulo o Produto educacional e a metodologia da aplicação do mesmo.

CAPÍTULO 2 - PRODUTO EDUCACIONAL E METODOLOGIA

O Produto Educacional (PE) apresentado neste capítulo é um texto de apoio contendo uma sequência didática (SD). Neste é apresentada uma proposta de como utilizar um conjunto de materiais de laboratório, disponibilizado pelo governo federal às escolas públicas. O conjunto escolhido foi o de Mecânica, e os experimentos envolvem o sistema massa-mola, para trabalhar o tema Lei de Hooke e o Princípio da Conservação de Energia. As seções seguintes iniciam-se pela apresentação da SD, descrição do conjunto experimental utilizado; seguidos da Metodologia utilizada na aplicação do PE.

2.1. Sequência Didática

O principal objetivo deste Produto Educacional (PE) é instigar os estudantes a respeito da lei de Hooke e do conceito de princípio de conservação de energia, a partir de experimentos utilizando-se molas helicoidais contidas em um dos *kits* de laboratório de Física disponibilizado pelo Ministério da Educação às escolas públicas do estado do Paraná.

Nesse *kit* encontra-se o material necessário para a montagem do sistema massa-mola; sistema, inclusive, considerado pelos professores e alunos das escolas sem ou pouca relevância.

A Diretriz Curricular do Estado do Paraná (DCE) para a componente curricular Física, propõe em seu conteúdo estruturante **Movimento** dois conteúdos classificados como básicos para a 1ª série do Ensino Médio, a saber: energia, e o princípio de conservação de energia e gravitação. Ambos os conteúdos básicos propostos pela DCE de Física, devem ser desenvolvidos em sala de aula levando em consideração aspectos como o contexto sócio-histórico, além da teoria científica dos conteúdos. [ParFís08]

Considerando ainda, abordagens que enriqueçam o cotidiano dos estudantes por meio de problematizações para melhor compreensão das ideias e leis associadas a estes conteúdos básicos. Na presente sequência didática (SD), envolvendo a Lei de Hooke por intermédio da determinação da constante elástica de

uma mola e a relação desta com a lei de conservação de energia mecânica, foi aplicada na 1ª série do Ensino Médio no Colégio Estadual Antonio Tortato – Ensino Médio e Normal (CEAT) do município de Paranacity, estado do Paraná. [PPC CEAT]

Um aspecto que influenciou diretamente no processo proposto pelas Diretrizes Curriculares da Educação Básica (DCE's) do Estado do Paraná para a componente curricular Física está associada ao fator tempo. Essa componente curricular possui uma carga horária de 04 (quatro) horas/aula semanais, totalizando 80 (oitenta) horas/aulas (no mínimo) no decorrer de um semestre na modalidade Ensino Médio organizado por blocos de disciplinas semestrais³⁵. [TomMar13]

A seguir, apresenta-se uma descrição dos conjuntos disponibilizados pelo governo federal.

2.1.1 *Kit Experimental - MEC*

Para que haja mais clareza os experimentos pertencentes a esta sequência didática são:

- Exp. 01 - Determinação da constante elástica de uma mola utilizando o método estático;
- Exp. 02 - Determinação da constante elástica de uma mola utilizando o método dinâmico;
- Exp. 03 - Determinação da constante elástica da mola utilizando a associação de molas em série e em paralelo;
- Exp. 04 - Conservação de energia em materiais elásticos: o curioso caso da “lata energética”.

Cabe ressaltar que o *kit* disponibilizado pelo Ministério da Educação (MEC) e encaminhado ao CEAT por meio da Secretaria de Estado da Educação do Paraná (SEED/PR) esteve guardado em um balcão de madeira no laboratório de Ciências

³⁵O Ensino Médio Organizado por Blocos de Disciplinas Semestrais é uma modalidade de ensino implantada no Estado do Paraná pela Instrução 021/2008 – SUED/SEED a partir do ano de 2009. A implantação foi facultativa para os estabelecimentos de Ensino que ofertassem a modalidade Ensino Médio anual. As componentes curriculares da Matriz Curricular estão organizadas em dois blocos de componentes curriculares semestrais ofertados concomitantemente. A carga horária fica concentrada em um semestre devendo cumprir no mínimo 100 dias letivos. [TomMar13]

Naturais do Colégio Estadual Antonio Tortato. A Figura 2.1 mostra uma foto do *kit* utilizado na SD para os Experimentos de 1 a 3, referente ao sistema massa-mola.



Figura 2.1 - Imagem fotográfica do *kit* experimental de mecânica, doado pelo MEC, utilizado na aplicação da SD. FONTE: o autor.

Inicialmente esse *kit* continha apenas seis molas e pouquíssimas massas aferidas. Fez-se necessário então a adaptação de materiais, pois necessitam-se molas aos pares, de mesmo comprimento diâmetro da mola e do fio. Essa adaptação contou com a inclusão dos seguintes materiais a própria escola já tinha e que também foram disponibilizados pelo Ministério da Educação (MEC) em momentos diferentes, a saber:

- Pares de molas com mesmo diâmetro e comprimento (inclusos na imagem da Figura 2.1);
- Cronômetro (Figura 2.2 (a));
- Suporte universal (Figura 2.2 (d));
- Massas com gramaturas conhecidas (Figura 2.2 (b));
- Balança;
- Réguas de 30 cm e 100 cm (fixado no suporte com fita adesiva - Figura 2.2 (d));
- Fio de algodão o de nylon, para usar como suporte de massas diretamente na mola de acordo com o experimento;
- Paquímetro (Figura 2.2 (a)).

O suporte de massas para uso no Experimento 2, para a conexão de duas molas em série, circulada em vermelho na Figura 2.2 (c), pode ser substituída por um sistema simples, constituído de 3 clips (2 de mesma dimensão), um pedaço de capa de caderno do lado da espiral (em destaque), se for capa dura não há necessidade do pedaço de madeira (palito de sorvete por exemplo) como ilustrada na Figura 2.2 (e).

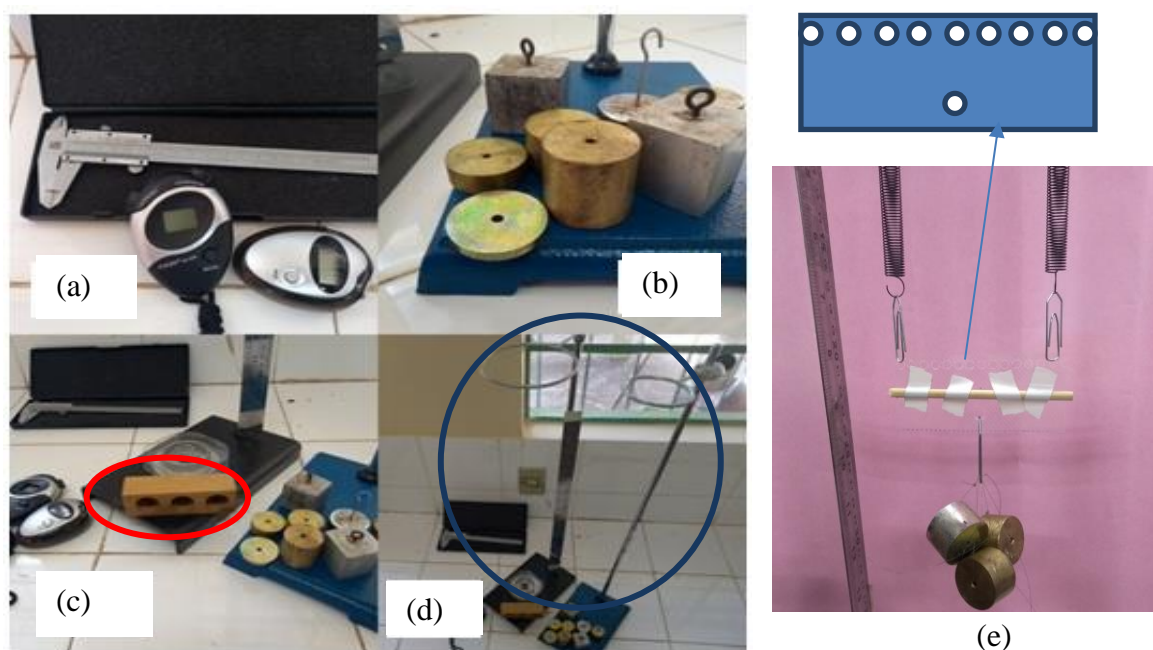


Figura 2.2 - Imagem fotográfica dos materiais incluídos no kit disponibilizado pelo MEC: (a) paquímetro³⁶ e cronômetros; (b) em destaque as massas com a gramatura gravada, que se encontram apresentadas em (c) e em (d); (c) base lateral para massas circulada em vermelho; (d) circulados em azul: suporte universal com o suporte lateral (arredondado) e régua, (e) em detalhes proposto pelo autor, um suporte para massas opcional ao de madeira (c). FONTE: o autor.

As listas de materiais utilizadas para cada experimento estão especificadas no roteiro de cada uma delas apresentadas na seção 2.4. Inclusive os materiais do Experimento 4 em que parte foi providenciada pelos próprios alunos.

Ainda no contexto da SD foram realizadas atividades experimentais em quatro etapas envolvendo o sistema massa-mola e a transformação de energia potencial elástica e conservação de energia mecânica. Os resultados experimentais foram analisados por meio de abordagem matemática e física na perspectiva da Teoria de D. Ausubel relacionada a uma aprendizagem significativa.

³⁶Utilizado pelo docente para verificar as dimensões da mola. Como fazer o uso do paquímetro: consultar referência [MukFer18].

2.2 Aplicação do Produto Educacional

Apresentamos uma “Ficha Técnica” acerca desta sequência didática no intuito de facilitar e deixar mais claro o entendimento deste produto educacional e de sua aplicação junto aos estudantes. Esta ficha contém a descrição dos questionários aplicados aos estudantes, bem como, relaciona os experimentos utilizados na sequência didática proposta. Apresentam-se também, os questionários de concepções prévias (QPr), os roteiros experimentais (Exp.) e os questionários avaliativos aplicados após a realização dos experimentos (QPo).

2.1.1 Aspectos técnicos³⁷ da SD e sua aplicação

O Quadro 2.1 apresenta a ficha técnica utilizada na aplicação da sequência didática no contexto do produto educacional proposto. O cabeçalho da ficha contém informações da escola em que se aplica o produto, do professor regente e da respectiva série. No corpo da ficha constam os conteúdos que foram desenvolvidos na sequência, os seus objetivos e os critérios de avaliação.

Quadro 2.1: Ficha Técnica da Sequência Didática. FONTE: o autor.

TEMA: Lei de Hooke e Conservação de Energia	
Ficha Técnica	
ESCOLA: Colégio Estadual Antonio Tortato – Ensino Médio e Normal	
MUNICÍPIO: Paranacity - PR	
PROFESSOR REGENTE: Felipe Endo Arruda Nitsche	
PÚBLICO ALVO: 1ª série – Ensino Médio– Aplicação em duas turmas: A e B.	
COMPONENTE CURRICULAR: Física	
CONTEÚDOS	Conceituais: -Lei de Hooke: Força elástica; -Constante elástica de uma mola: método estático e dinâmico; -Princípio da Conservação de energia mecânica. Procedimentais -Medições da constante elástica de uma mola helicoidal

³⁷O material apresentado nesta Ficha Técnica encontra-se no Apêndice A: Produto Educacional.

	<p>utilizando-se de métodos diferentes.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Confecção, leitura e interpretação de gráficos e tabelas. -Relação do Princípio de Conservação de Energia Mecânica com a Lei de Hooke e outros sistemas elásticos, por meio de uma sequência didática. <p>Atitudinais:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Proporcionar e estimular o trabalho em grupo. -Inserir momentos de cooperação entre os estudantes nos momentos de realização das atividades práticas. -Estabelecer meios nos quais os estudantes possam sentir-se estimulados a desenvolver os conteúdos da Física.
OBJETIVOS	<ul style="list-style-type: none"> -Determinação da constante elástica da mola em diferentes configurações de duas formas estático e dinâmico; -Aplicar a lei de Hooke. -Desenvolver atividades práticas com <i>kits</i> de materiais que a escola já possui. -Realizar interpretação física e matemática em sistemas massa-mola. -Proporcionar o trabalho em grupo, cooperativo. -Desenvolver a expressão oral e escrita dos estudantes. -Realizar experimentação com sistema massa-mola e em um elástico contorcido e verificar a conservação de energia em tal sistema de modo a entender energia como entidade física que pode se manifestar de diversas formas e, no caso da energia mecânica, em energias cinética, potencial elástica e gravitacional.
AVALIAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> -Interpretação física e matemática acerca dos experimentos realizados com sistema massa-mola e a transformação de energia potencial elástica em energia cinética de uma forma lúdica, visando à aprendizagem significativa de D. Ausubel a partir da análise dos questionários respondidos pelos alunos. - Impressão registrada pelo docente, durante e após a aplicação do PE em relação à reação atitudinais dos alunos.

Para a aplicação da SD, conforme a Ficha Técnica apresentada no Quadro 2.1, as aulas foram distribuídas conforme cronograma apresentado no Quadro 2.2.

No Quadro 2.2, contêm também uma proposta com as respectivas atividades para cada aula. Sendo cada uma das aulas de 50 minutos. Incluiu-se também a atividade docente, em que o docente utilizará para analisar as informações adquiridas durante as aulas e seguir com a aplicação da SD. Fato esse importante para o processo ensino-aprendizagem. Pois ao ir analisando cada etapa é possível reestruturar o conteúdo e aplicação se necessário for.

Esse cronograma foi separado para duas turmas A e B, adaptado de acordo com a disponibilidade de tempo de cada turma. A Turma A com um total de 10 h/a em que foi realizado os experimentos 01 e 02, e a Turma B o total de 29 h/a em que foram realizados os 4 experimentos.

Esclarecendo que o docente pode escolher quais partes quer trabalhar com os alunos, os Experimentos são independentes entre si. Dando também a liberdade de forma que possam relacionar uns aos outros, como o aqui proposto em relacionar os resultados obtidos dos Exp. 02 e 03, para uma interpretação via gráficos. Outras sugestões são colocadas no roteiro de cada experimento.

Quadro 2.2 – Cronograma de Aplicação da SD. Em que QPr se refere ao questionário prévio e QPo ao questionário pós aplicação dos experimentos. FONTE: o autor.

CRONOGRAMA DE APLICAÇÃO DA SD		
Data	ATIVIDADE DESENVOLVIDA	Nº de aulas³⁸
TURMA A		
19/10/2017	Determinação da constante elástica da mola – método estático - Concepções prévias dos estudantes da 1ª série A. Aplicação de questionário descritivo (QPr1)	02 horas/aulas.
20/10/2017 e 26/10/2017.	Determinação da constante elástica da mola – método estático - Realização do Exp. 01 conforme roteiro contido no PE, pela turma da 1ª série A. Aplicação de questionário acerca do experimento (QPo1).	04 horas/aulas.

³⁸Considerando a hora-aula de 50 minutos.

	Análise das concepções prévias (QPr1) e comparação das mesmas com o questionário aplicado (QPo1) após a realização do experimento, conforme D. Ausubel.	Atividade docente
27/10/2017	Determinação da constante elástica da mola – método dinâmico: Concepções prévias dos estudantes da 1ª série A. Aplicação de questionário descritivo (QPr2).	02 horas/aula.
03/11/2017	Determinação da constante elástica da mola – método dinâmico: Realização do Exp. 02 conforme roteiro contido no PE, pela turma da 1ª série A. E, aplicação de questionário acerca do experimento (QPo2).	02 horas/aula.
	Análise das concepções prévias (QPr2) e comparação das mesmas com o questionário aplicado após (QPo2) a realização do experimento, conforme D. Ausubel.	Atividade docente
TURMA B		
04/04/2018	Determinação da constante elástica da mola – método estático - Concepções prévias dos estudantes da 1ª série B. Aplicação de questionário descritivo (QPr1).	02 horas/aulas.
05/04/2018 e 11/04/2018.	Determinação da constante elástica da mola – método estático - Realização do Exp. 01 conforme roteiro contido no PE, pela turma da 1ª série B. Aplicação de questionário acerca do experimento (QPr1).	04 horas/aulas.
	Análise das concepções prévias (QPr1) e comparação das mesmas com o questionário aplicado após a realização do experimento (QPo1), conforme D. Ausubel.	Atividade docente
26/04/2018	Determinação da constante elástica da mola – método dinâmico - Concepções prévias dos	02 horas/aula.

	estudantes da 1ª série B. Aplicação de questionário descritivo (QPr2).	
03/05/2018 e 04/05/2018	Determinação da constante elástica da mola – método <i>dinâmico</i> - Realização do Exp. 02 conforme roteiro contido no PE, pela turma da 1ª série B Aplicação de questionário acerca do experimento (QPo2).	04 horas/aula.
	Análise das concepções prévias (QPr2) e comparação das mesmas com o questionário aplicado após a realização do experimento (QPo2), conforme D. Ausubel.	Atividade docente
24/05/2018	<i>Associação de molas em série</i> e determinação da constante elástica da mola: Aplicação de questionário com concepções prévias para a turma B (QPr3).	02 horas aulas (contraturno)
06/06/2018 e 07/06/2018	<i>Associação de molas em série</i> e determinação da constante elástica: realização do Exp. 03 , conforme roteiro contido no PE. Aplicação de questionário acerca do experimento (QPo3).	04 horas aulas (contraturno)
08/06/2018	<i>Associação de molas em paralelo</i> e determinação da constante elástica da mola - Aplicação de questionário com concepções prévias para a turma B (QPr4).	02 horas aulas (contraturno)
20/06/2018 e 21/06/2018	<i>Associação de molas em paralelo</i> e determinação da constante elástica - Realização do Exp. 03 , conforme roteiro contido no PE. Aplicação de questionário acerca do experimento (QPo4).	04 horas aulas (contraturno)
28/06/2018	A “ <i>lata energética</i> ” - Armazenamento de energia potencial elástica em molas e conservação de energia mecânica: Aplicação de questionário prévio (QPr5).	01 hora aula.

04/07/2018 e 05/07/2018.	A “lata energética” - Armazenamento de energia potencial elástica em molas e conservação de energia mecânica - Realização do Exp. 04 e aplicação do questionário posterior (QPo5).	04 horas aulas (contraturno)
	Análise das concepções prévias (QPr3, QPr4 e QPr5) e comparação das mesmas com os questionários aplicados após (QPo3, QPo4 e QPo5) a realização dos referidos experimentos, conforme D. Ausubel, que visa uma aprendizagem significativa.	Atividade docente

2.3 Questionários sobre as concepções prévias (QPr)

Conforme já fora mencionado nessa dissertação de mestrado, o objetivo principal do PE utilizado nesta sequência didática é a compreensão dos estudantes sobre um fenômeno físico. Ao utilizarmos a teoria de aprendizagem significativa, proposta por D. Ausubel como suporte avaliativo desta SD, queremos observar os avanços alcançados pelos estudantes no que diz respeito à compreensão do conteúdo físico aplicado. Para que a avaliação fosse o mais coerente possível propomos aos estudantes a resolução de questionários de concepções prévias, que foram aplicados antes da realização dos experimentos propostos na SD.

Cabe frisar que os questionários de concepções prévias(QPr) foram aplicados um por vez, conforme apresentado no Quadro 2.2, e na sequência apresentada na Figura 2.3.

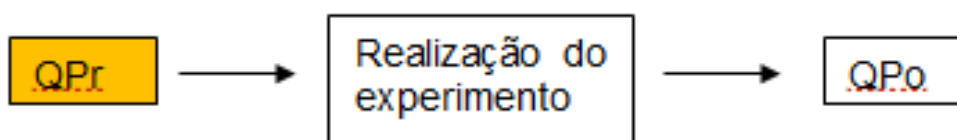


Figura 2.3 - Desenho esquemático indicando o momento em que será aplicado o QPr no contexto da SD.FONTE: o autor

Lembrando que o será um tipo de Interpretação e Análise dos resultados obtidos em cada experimento. Nos Quadros 2.3 ao 2.6 apresentam os questionários prévios (QPr) a ser desenvolvidos com o grupo de alunos participantes.

Quadro 2.3 - Questionário 01 de concepções prévias (QPr1) aplicado aos estudantes antes da realização do Exp. 01: Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal: Lei de Hooke-Método Estático. FONTE: o autor.

Questionário 01: Concepções prévias: Lei de Hooke – método estático.

01. O que você entende por elasticidade?
02. O que você entende por materiais deformáveis?
03. Como você diferenciaria materiais deformáveis de materiais indeformáveis?
04. O que você sabe sobre a Lei de Hooke?
05. O que entende por constante elástica?
06. Como você relacionaria um sistema massa-mola com a conservação de energia?

Quadro 2.4 - Questionário 02 de concepções prévias (QPr2) aplicado aos estudantes antes da realização do Exp. 02 - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal: Lei de Hooke-Método Dinâmico. FONTE: o autor.

Questionário 02: Concepções prévias: Lei de Hooke – método dinâmico

01. Você acha que seria possível determinar a constante elástica de uma mola usando-se movimentos oscilatórios?
02. Qual a sua definição para movimento oscilatório?
03. De acordo com a etapa I (caso estático) que você realizou, é possível chegar a um mesmo valor de k usando-se procedimentos diferentes?
04. De acordo com suas concepções, qual(is) é (são) o(s) principal (is) erro(s) que pode(m) ocorrer na realização da etapa II (caso dinâmico) para determinar a constante elástica de uma mola?

Quadro 2.5 - Este questionário de concepções prévias, Questionário 03 (QPr3), foi aplicado aos estudantes antes da realização do Exp. 03 - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal: Lei de Hooke - Associação de molas em Série e em Paralelo. FONTE: o autor.

Questionário 03: Concepções prévias: Lei de Hooke – Associação de molas em série e em paralelo.

01. O que você entende por associação de molas?
02. Você acha ser possível determinar a constante elástica de mais de uma mola por vez? Como?
03. Qual deve ser o valor teórico da constante elástica da associação em série,

de acordo com seu raciocínio? (o dobro, a metade ou a raiz quadrada da constante de uma das molas).

04. Qual deve ser o valor teórico da constante elástica da associação em paralelo, de acordo com seu raciocínio? (o dobro, a metade ou a raiz quadrada da constante de uma das molas).

05. Você acha que ao se utilizar mais de uma mola e tentamos determinar sua constante elástica, estamos mais propensos ao erro? Por quê?

06. Como você relacionaria uma associação de molas (em série ou em paralelo) com o princípio de conservação de energia?

Quadro 2.6 - Questionário 04 de concepções prévias (QPr4) aplicado aos estudantes antes da realização do Exp. 04 - Conservação de energia em materiais elásticos: o curioso caso da “lata energética”. FONTE: o autor.

Questionário 04: Concepções prévias: Armazenamento de energia potencial e Conservação de Energia Mecânica– O curioso caso da “lata energética”.

01. Você acha ser possível construir um sistema de armazenamento de energia? Como você o faria?

02. Qual a relação entre uma mola helicoidal com um elástico?

03. Como a energia mecânica pode estar associada em um sistema massa-mola?

04. O que você entende por transformação de energia?

05. O que você entende por energia potencial elástica?

2.4 Relação dos experimentos³⁹ utilizados na SD

Os experimentos realizados por meio desta sequência didática foram realizados em quatro etapas distintas utilizando molas helicoidais e materiais deformáveis elasticamente:

- **Exp. 01** - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal – método estático (Quadro 2.6);
- **Exp. 02** - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal – método dinâmico (Quadro 2.8);

³⁹Os Experimentos 1 e 2 é uma adaptação do experimento de oscilações mecânicas do Manual de Laboratório de Física Experimental II do Departamento de Física da UEM, autores do texto: H. Mukai e P. R. G. Fernandes, disponível no site: <http://site.dfi.uem.br/downloads-apostilas/>

- **Exp. 03** - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal utilizando associação em série e em paralelo de molas (Quadro 2.10);
- **Exp. 04** - Conservação Energia em materiais deformáveis – O curioso caso da “lata energética” a partir do armazenamento de energia (Quadro 2.14).

Os mesmos serão apresentados individualmente na sequência ilustrada na Figura 2.4.

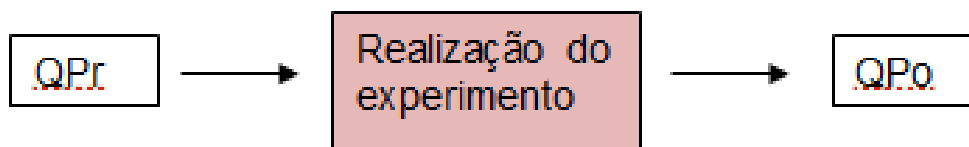


Figura 2.4 - Desenho esquemático indicando o momento em que será aplicado cada **experimento** no contexto da SD.FONTE: o Autor

Os procedimentos experimentais selecionados para esta SD justificam-se pelo fato dos estudantes possuírem pouco contato com a determinação da constante elástica de forma experimental e a relação desta com um dos princípios fundamentais em Física: o Princípio de Conservação da Energia Mecânica durante a etapa de Ensino Médio. A seguir apresentamos os roteiros experimentais utilizados. Os valores das massas são sugestões e as que foram adotadas são dos *kits* experimentais utilizados.

Quadro 2.7 - Roteiro experimental 01 (Exp. 01): Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - método estático.FONTE: o autor.

Exp. 01- DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE ELÁSTICA DE UMA MOLA HELICOIDAL – MÉTODO ESTÁTICO

Objetivos:

Verificar a lei de Hooke e determinar a constante elástica de uma mola helicoidal utilizando o método estático.

Materiais Utilizados:

01 suporte universal;
01 haste vertical;

01 balança digital com aferição em gramas;
01 fixador metálico para pendurar a mola (suporte lateral);
01 régua de 30 cm;
01 fita adesiva;
01 tesoura sem ponta;
01 mola helicoidal (sugestão: mola com 1,50 cm de diâmetro e 15,00 cm de comprimento);
07 a 08 massas de 20g cada (gramatura sugerida).
Fio de algodão ou de nylon.

Procedimento Experimental:

1. Monte o aparato experimental conforme a Figura 2.5 (a). Utilize a fita adesiva para prender a régua de 30 cm ((5) na Figura 2.5 (1) na lateral da haste vertical (2). Em (b) em destaque a altura para fixar a régua: a extremidade da mola deve estar alinhada na posição 0,00 cm da régua.

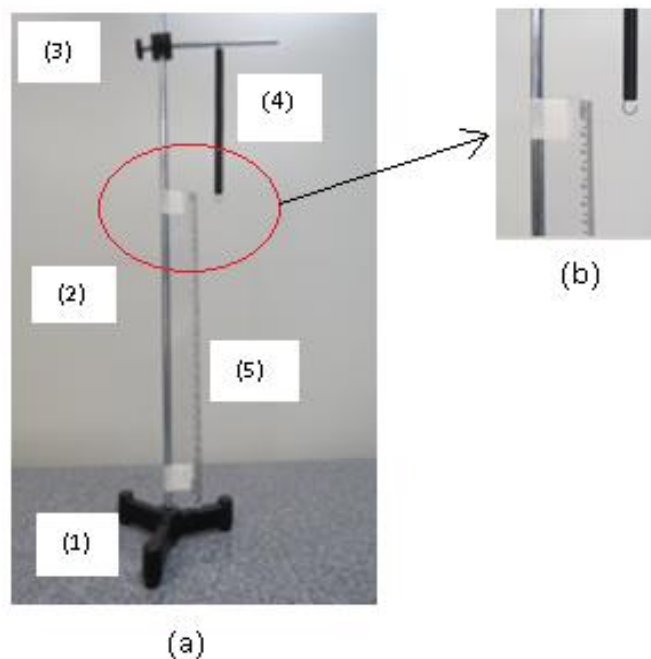


Figura 2.5 - (a) Foto da montagem inicial para determinação da constante elástica da mola A. Em que: (1) Base da haste; (2) Haste do suporte; (3) suporte lateral; (4) mola helicoidal; (5) régua. Em destaque (b) a indicação da posição do comprimento inicial da mola A, $L_0 = 0,00$ cm. FONTE: o autor.

2. Enumere as massas e meça a massa individual ou de cada conjunto (sugestão: iniciar com 60 g + suporte para massas). Se as massas são de

valores não conhecidos, ou se utilizar um suporte cujo valor da massa não possa ser desprezado (tal como a de um pedaço de fio de nylon que é desprezível) utilizar os valores do conjunto suspenso após realizar a aferição das mesmas em uma balança digital. Anote os dados das massas na Tabela 2.1;

Caso a massa não tenha um gancho e seja vazado, utilize o fio de algodão ou de nylon como suporte para a massa, pegue um pedaço do fio, passe-o pelo orifício central da massa e de um nó em ambas as extremidades do fio (Figura 2.6 (a)) de forma que a mesma possa ser fixada no gancho existente na extremidade da mola. Repita para as demais massas o mesmo procedimento. Se necessário una duas massas (Figura 2.6 (b)) pelo fio, formando 4 conjuntos de massas separados.



Figura 2.6 - Desenhos ilustrativos de como utilizar o fio de algodão ou de nylon como um suporte para massas: (a) uma única massa e em (b) visão frontal de mais de uma massa (no caso duas massas). FONTE: o autor.

3. Determine a força peso do conjunto, por meio da equação: $P = mg$, adotando $g = 980 \text{ cm/s}^2$, anotando o valor obtido na Tabela 2.1, na coluna: $F(N) = P$;
4. Suspenda pelo fio ou suporte o conjunto (60 g (massas aferidas) + suporte para massas) na extremidade da mola;
5. Verifique a distensão $\Delta L = L - L_0$ sofrida pela mola, anotando o valor obtido na Tabela 2.1 (coluna ΔL (cm));
6. Retire o conjunto (60 g (massas aferidas) + suporte para massas) e verificar se a mola volta para a posição inicial $L_0 = 0,00 \text{ cm}$.
7. Retorne o conjunto de massas na extremidade da mola e crescente nova(s) massa(s) (sugestão: 20 g) ao gancho suporte repetindo os passos 2 a 8 completando a Tabela 2.1.

8. Repita o passo 2 a 7 para as demais massas completando a Tabela 2.1.

9. Calcule a constante elástica por meio da Equação [1.12].

Observação: Manteve-se o deslocamento como ΔL , pois caso não utilizem $L_o = 0,00 \text{ cm}$, basta subtrair o valor que a massa deslocou, L , do valor de L_o .

Tabela 2.1 - Dados para determinação da constante elástica da mola: massa (g) são os valores das massas individuais a ser colocada no suporte para pendurar na mola; m_T (g) é a massa total formada pelas massas individuais mais seu suporte; P a força peso do conjunto suspenso, ΔL (cm) o deslocamento causada para cada conjunto suspenso na mola, e k (dinas/cm) a constante elástica da mola a ser determinada. As massas escolhidas são sugestões. FONTE: o autor.

	Massa (g)	Massa Total m_T(g)	$F \text{ (din)} = P = m_T g$	ΔL(cm)	$k = \frac{F = P}{\Delta L}$ (dinas/cm)
1	60				
2	80				
3	100				
4	120				
5	140				
Média aritmética da constante elástica (k) da mola A					
Massa do suporte: _____ g. (se utilizar)					

Quadro 2.8 - Roteiro experimental 02 (Exp. 02) - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - método dinâmico. Fonte: o autor.

EXP. 02: DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE ELÁSTICA DE UMA MOLA HELICOIDAL – MÉTODO DINÂMICO

Objetivos:

Verificar a lei de Hooke e determinar a constante elástica de uma mola helicoidal utilizando-se de movimentos oscilatórios na vertical.

Materiais Utilizados:

- 01 suporte universal;
- 01 haste vertical;
- 01 balança digital com aferição em gramas;
- 01 fixador metálico para pendurar a mola (suporte lateral);
- 01 régua de 30 cm;
- 01 fita adesiva;
- 01 tesoura sem ponta;

01 mola helicoidal (a mesma utilizada no Exp. 01);

01 conjunto de massas (sugestão: utilize as massas do Exp. 01, 20 g cada, o ideal é utilizar uma quantidade total em que o movimento oscilatório permita uma boa aferição do tempo – faça testes para ver qual o melhor - esse valor permanecerá fixo).

01 suporte de massas ou utilizar o fio de algodão ou de nylon como suporte para as massas;

01 cronômetro.

Procedimento Experimental:

1. Monte o sistema experimental, utilizando o suporte universal e prendendo com fita adesiva a régua de 30 cm na lateral da haste vertical, como apresentado na Figura 2.5 (a).

2. Posicione a extremidade inferior na mola em $L_0 = 0,00$ cm (Figura 2.5 (b)).

3. Meça a massa do conjunto (massa + suporte para massas (anote na Tabela 2.2)); Para facilitar utilize as mesmas massas do Exp. 1 para formar o conjunto a ser utilizado. Caso vá executar somente este experimento, prepare as massas conforme indicado na Figura 2.6.

4. Suspenda o conjunto (massas+ suporte para massas) na extremidade da mola;

5. Puxe ou eleve (observe na régua o quanto foi alongada ou elevada, para que possa liberar sempre do mesmo ponto) manualmente a(s) massa(s) no sentido vertical tal que saia da posição de equilíbrio, solte o conjunto de massas e simultaneamente acione o cronômetro que deve estar zerado. Cronometre o tempo total para realizar três oscilações completas (1 oscilação completa = 1 período (T) = o processo ida e volta);

6. Para a mesma massa repita 10 vezes o processo do item 5. Lembre-se de zerar o cronômetro a cada tomada de tempo.

7. Determine o valor do período, T , de oscilação do sistema a partir dos valores médios dos tempos (tempo total dividido pelo número de oscilações – nesse caso, três). Após, divida pelo número de repetições (no caso 10) para obter o valor do período médio. Anote os valores na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Tempos medidos e período médio para três oscilações completas, repetindo-se dez vezes o processo. FONTE: o autor

Processo (medida)	Tempo total medido (s)	Período médio (s)
01		
02		
03		
04		
05		
06		
07		
08		
09		
10		
Tempo de 01 Período das 10 repetições ($T_m(s)$)		
Massa total suspensa $m(g)$		

8. Para a determinação da constante elástica da mola helicoidal utilizada, remetemos à Equação [1.20]. Considerar $\pi = 3,14$. Usar o período médio

(T_m) em T da Equação [1.20]: $k_{din.} = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$.

Quadro 2.9 - Roteiro experimental 03 (Exp. 03): Determinação da constante elástica de um par de molas helicoidais utilizando a associação de molas em série e em paralelo. FONTE: o autor.

EXP. 03: DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE ELÁSTICA DE UM PAR DE MOLAS HELICOIDAIS UTILIZANDO A ASSOCIAÇÃO DE MOLAS EM SÉRIE E EM PARALELO

Objetivos:

Verificar a lei de Hooke e determinar a constante elástica de duas molas helicoidais utilizando-se de métodos de associação de molas: série e paralelo.

Materiais Utilizados:

01 suporte universal;

01 haste vertical (presa ao suporte universal);

01 balança digital com medida em gramas;

01 fixador metálico para pendurar a mola (Suporte lateral/horizontal);

01 régua de 100 cm;

01 fita adesiva;

02 molas helicoidais de mesmo comprimento e diâmetro (sugestão: duas molas iguais a utilizada no Exp. 01);

01 conjunto contendo 07a 08 massas aferidas com 20g cada (utilizar as mesmas massas do Exp. 01);

01 suporte de massas ou utilizar o fio de algodão ou de nylon como suporte para as massas;

Procedimento Experimental:

- **Associação em série**

1. Monte o sistema experimental da Figura 2.7, utilizando o suporte universal e prendendo com fita adesiva a régua de 100 cm na lateral da haste vertical (É a mesma montagem apresentada na Figura 2.5, somente posicionando a origem da régua na extremidade livre da mola inferior, pois as molas estão associadas em série, se necessário adote uma a régua mais longa (Figura 2.7 (b));
2. Associe as molas em série (Figura 2.7 (a) e (b)), e a massa m no gancho da mola suspensa no suporte lateral, conforme ilustrado na Figura 2.7 (a(3)) e (b)).

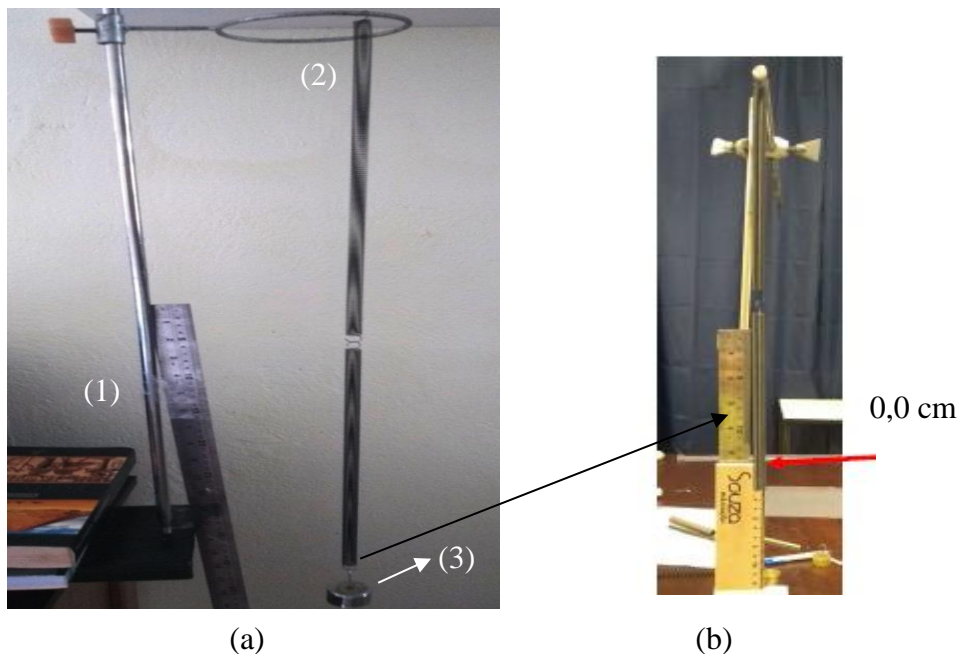


Figura 2.7 – Imagem fotográfica da montagem experimental, para duas molas associadas em série. Em (a (1)) o suporte universal apoiada na extremidade de uma mesa e fixada por meio de livros apoiadas sobre a mesma, desconsiderar a régua apoiada no suporte; (a(2)) suporte lateral (no caso, uma argola metálica) a qual uma das extremidades do sistema fica pendurado; (a(3)) massa m aferida suspensa na mola. E, em (b) indicando a última espiral da mola na posição 0,0 cm

da régua de madeira (utilizada por ser mais longa em relação à de metal). FONTE: o autor.

➤ **Método Estático:**

3. Utilize a mesma sequência de massas já selecionadas, enumeradas e aferidas no Exp. 01, anote seus valores na sequência na Tabela 2.3 – parte estática;
4. Na sequência da enumeração, suspenda a massa 1 na mola inferior, e anote o deslocamento ($\Delta L (cm)$) provocado pela massa no sentido vertical na Tabela 2.3.
5. Acrescente a massa 2, e repita o procedimento 4;
6. *Repita o item 5, para as demais massas;*

➤ **Método Dinâmico:**

7. Escolha um conjunto de massa, sugestão utilizar o conjunto da parte dinâmica de 1 mola (Exp. 02) afira e anote sua massa m_T na Tabela 2.3. Caso vá executar somente este experimento, prepare as massas conforme indicado na Figura 2.6.
8. Suspenda ou puxe a massa suspensa (anotar na régua o quanto foi alongada, para liberar sempre do mesmo ponto) e ao liberar acione no mesmo instante o cronômetro, conte 3 oscilações completas, e trave o cronômetro. Anote o resultado do tempo, zere o cronometro e repita por mais 5 vezes. Caso a mola se mova no suporte, fixe-a com fita adesiva de forma que não atrapalhe o movimento oscilatório;

Tabela 2.3 – Dados (a) parte estática do deslocamento para cada conjunto de massas suspensas e (b) parte dinâmica: tempo total (t) em segundos, de 3 períodos de oscilações determinados na associação em série de duas molas helicoidais. Em que a massa é uma massa m suspensa de valor fixo em gramas, Período médio do tempo de 3 oscilações e a média das 5 repetições. FONTE: o autor.

Estático				Dinâmico			
Medida	Massa(g)	$\Delta L(cm)$	Peso (dinas)	Massa (g)	Medida	Tempo total (t) de 3 oscilações completas em	Período de oscilação (s) $T = \frac{t}{3}$

						<i>segundos</i>	
1					1		
2					2		
3					3		
4					4		
5					5		
						$T_{\text{médio}}(\text{s})$	
k (dyn/cm)						k_{din} (dyn/cm)	

9. Para comparar os resultados, determinar a constante elástica da série k_s , utilizando a Equação:

$$\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{1}{k_s} .$$

Usando as constantes elásticas k_1 e k_2 obtidas na Etapa 1- caso estático, e compare os resultados obtidos.

- **Associação em Paralelo**

1. Para a associação das molas em paralelo, monte o sistema experimental da Figura 2.8, utilizando o suporte universal e prendendo com fita adesiva a régua de 100 cm na lateral da haste vertical (É a mesma montagem apresentada na Figura 2.5 (Exp. 01), posicionando as molas tal que fiquem paralelas uma em relação a outra).
2. Fixe a massa conforme indicado na Figura 2.8 (qualquer uma das duas opções (a) ou (b)), essa deve ficar suspensa de forma equilibrada, ou seja no ponto médio das duas molas;

Observação: Um sistema optativo para o suporte de massa indicado na Figura 2.8 (a), é o indicado na Figura 2.2 (e), cujo sistema todo montado é o da Figura 2.8 (b). Observando o uso de *clips*, para fixar o suporte nas molas, bem como um terceiro *clips* centralizado na parte inferior para pendurar as massas.

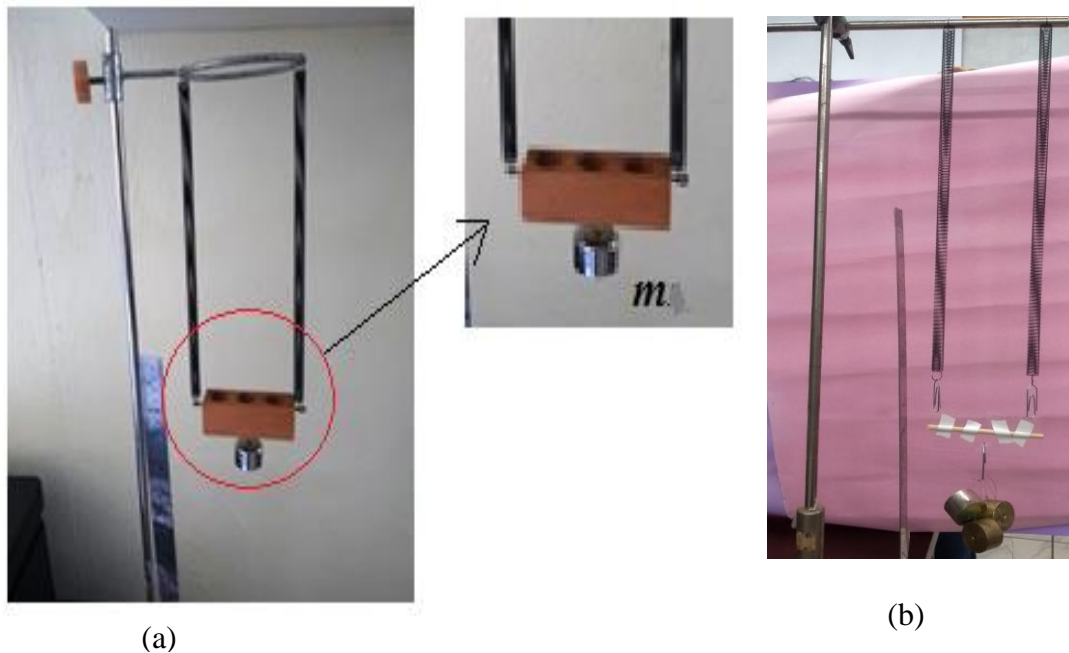


Figura 2.8 - Imagem fotográfica de duas molas iguais associadas em paralelo a ser utilizado no Exp. 03. (a) Em destaque apresentamos a fotografia da massa m e do suporte para massas de madeira, e em (b) o sistema utilizando o suporte alternativo (pedaço da capa de caderno de espiral – no caso uma capa transparente e um pedaço de madeira para mantê-lo reto ao adicionar as massas), confeccionado pelo autor (Figura 2.2(e)). FONTE: o autor.

Método Estático

3. Utilize a mesma sequência de massas já selecionadas, enumeradas e aferidas no Exp. 01, anote seus valores na sequência na Tabela 2.4 – parte estática;
4. Na sequência da enumeração, suspenda a 1ª massa na mola inferior, e anote o deslocamento provocado pela massa no sentido vertical;
5. Repita o item 3) para as demais massas, acrescidas uma a uma e medindo o deslocamento (ΔL (cm)) ocorridos por cada conjunto suspenso; Anote os dados na Tabela 2.4.

➤ Método Dinâmico

6. Para a parte dinâmica: escolha uma massa aferida. Utilize e anote o mesmo conjunto utilizado no Exp. 02 e 3.2 parte dinâmica. Anote o valor na Tabela 2.4;
7. Fixe a massa conforme indicado na Figura 4, essa deve ficar suspensa de

forma equilibrada, ou seja, no ponto médio das duas molas;

8. Eleve ou puxe na vertical o sistema suspenso pelo seu ponto médio e liberar a massa m_T (observe essa altura na régua para liberar sempre do mesmo ponto). Acione simultaneamente o cronômetro e trave quando contar 3 oscilações completas; Evite deslocar o sistema para os lados gerando movimentos aleatórios no sistema oscilante. Anote os dados na Tabela 2.4.
9. Zere o cronômetro a cada tomada de tempo;
10. Repita os itens 7 e 8 por mais cinco vezes, completando a Tabela 2.4:

Tabela 2.4 – Períodos de oscilações determinados na associação em paralelo de duas molas helicoidais. Dados (a) parte estática do deslocamento para cada conjunto de massas suspensas e (b) parte dinâmica: tempo total (t) em segundos, de 3 períodos de oscilações determinados na associação em série de duas molas helicoidais. Em que a massa é uma massa m suspensa de valor fixo em gramas, Período médio do tempo de 3 oscilações e a média das 5 repetições. FONTE: o autor,

Estático				Dinâmico			
Medida	Massa(g)	$\Delta L(cm)$	Peso (dinas)	Massa (g)	Medida	Tempo total (t) de 3 oscilações completas em segundos	Período de oscilação (s) $T = \frac{t}{3}$
1					1		
2					2		
3					3		
4					4		
5					5		
						$T_{médio}(s)$	
$k(\frac{dinas}{cm})$						$k_{din}(\frac{dinas}{cm})$	

11. Determine a constante elástica da associação em paralelo, utilizando a Equação [1.20];
12. Determine a constante elástica utilizando a Equação [1.8b]: $k_p = k_1 + k_2$, com os dados das constantes elástica de cada mola obtidas pelo método estático (Exp. 01), lembrando que as molas são iguais.

União dos dados dos Experimentos 1, 2 e 3:

➤ **Método Estático:**

Complete a Tabela 2.5 a partir da repetição dos procedimentos listados da parte 1, 2 e 3 estática.

Tabela 2.5 – Dados da massa suspensa ($M(g)$), sua força peso ($P(dyn)$) aferidos os deslocamentos (ΔL) - método estático dos experimentos 1, 2 e 3. FONTE: o autor.

		1 mola	Molas em série	Molas em paralelo
Massa (g)	Força Peso (dinas)	$\Delta L (cm)$	$\Delta L (cm)$	$\Delta L (cm)$

➤ **Método dinâmico:**

Do Exp. 02, e Exp. 03, anote as constantes elásticas obtidas por meio da Equação [1.20], na Tabela 2.6. Anote também os resultados obtidos para a constante elástica equivalente da associação em série e em paralelo. Bem como o desvio percentual em relação ao valor experimental de valor mais próximo ao “teórico”.

Tabela 2.6 - Dados da constante elástica para o caso dinâmico referente as Tabelas: 2.2, 2.3 e 2.4, obtidos da realização dos Experimentos 02 e 03 para uma mola, duas molas iguais em série e as mesmas molas em paralelo. A constante elástica da mola de 15,0 cm e 1,5 cm de diâmetro é dada por 6.533,3 dyn/cm . E o desvio percentual $D(\%)$ Fonte: o autor.

Massa (g) utilizada	Constante Elástica	01 mola – Exp. 02	Associação em série – Exp. 03	Associação em paralelo – Exp. 03
	$k_{dinâmico} \left(\frac{dyn}{cm}\right)$			
	$k_s \left(\frac{dyn}{cm}\right)$			
	$k_p \left(\frac{dyn}{cm}\right)$			
	$D(\%)$			

Quadro 2.10 - Roteiro experimental 04 (Exp. 04) - Conservação da Energia em materiais deformáveis - o curioso caso da “lata energética” a partir do armazenamento de energia potencial. FONTE: o Autor.

Exp. 04 - Conservação Energia em materiais deformáveis – O curioso caso da “lata

energética” a partir do armazenamento de energia potencial⁴⁰.

Objetivo:

- Construir um sistema de armazenamento de energia potencial.

Materiais Utilizados:

01 recipiente (lata ou um frasco de plástico tipo maionese vazio);
01 elástico do tipo chato contendo 5 mm de largura e 40 cm de comprimento;
01 mola helicoidal;
01 parafuso grosso com porca⁴¹ (tipo: 1/4 x 7/8 polegadas);
02 palitos de fósforo;
03 pregos com cabeça (tipo: 17 x 21 polegadas);
01 martelo;
01 alicate.

Procedimento Experimental:

1. Faça um furo centralizado, com o prego e o martelo, bem no meio da tampa do recipiente (lata ou frasco). Se necessário, aqueça a ponta do prego (segure o mesmo com um alicate) utilizando a chama de um fogão, ou leve o recipiente furado. (CUIDADO: faça esse procedimento com o auxílio de um adulto!).
2. Fazer um segundo furo centralizado no fundo do recipiente utilizando o prego e o martelo. Se for um recipiente de plástico utilize a mesma técnica de aquecer o prego do item 1, e fure o fundo do recipiente e sua tampa. Cuidado para não tocar no prego caso o aqueça;
3. Rosqueie a porca até a cabeça do parafuso.
4. Faça um nó no elástico e prender o mesmo entre o parafuso e a porca. Observe que o parafuso deve ficar no ponto médio no sentido mais longo do frasco, conforme indica a Figura 2.9.
5. Passe uma extremidade do elástico pelo furo, mantendo a outra extremidade

⁴⁰O Experimento 04 é uma adaptação do experimento “Lata Energética” disponível em FUKUI, Ana. (org.). Ser protagonista: física, 1º ano: ensino médio. Ed. Responsável: Ana Paula S. Nani. 3. Ed. – São Paulo, 2016.

⁴¹1 polegada (in) = 2,54 cm.

do lado de fora da tampa preso com um palito. Passe a outra extremidade do elástico pelo outro furo, localizado no fundo do recipiente, e prendendo com outro palito (Figura 2.9). O recipiente deve estar bem fechado pelo elástico, ficando o parafuso e a porca dentro do frasco.

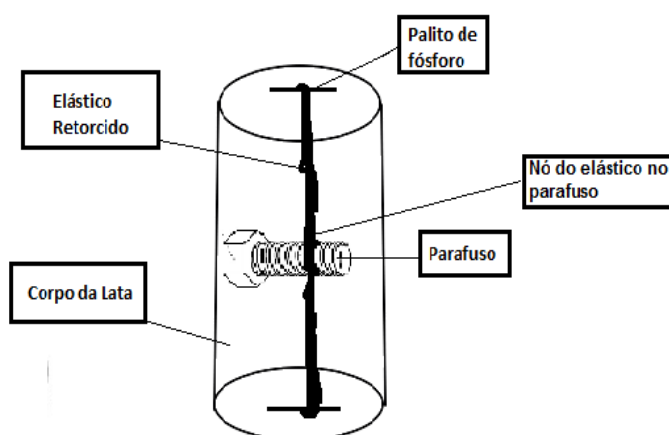


Figura 2.9: Desenho ilustrativo da montagem da “lata energética”. FONTE: o autor.

6. Balance o recipiente de forma que o parafuso gire o elástico;
7. Coloque a lata/recipiente em uma superfície plana e observe o que ocorre.
8. Repita o procedimento 6 e colocar a “lata energética” em uma superfície que contenha uma pequena inclinação e observar o que acontece.
9. Substitua o conjunto elástico + parafuso por uma mola helicoidal e prenda-a nos furos contidos na lata com o auxílio de um prego (17 x 21). Utilize o alicate para ter mais precisão no momento em que for amarrar as extremidades da mola aos pregos.
10. Rosqueie um dos pregos da “lata energética” ao qual a mola está fixa e posicione a lata/recipiente em uma superfície plana e impulsioná-la de modo que a mesma role.
11. Observe e discuta sobre o que acontece.

Observação: o passo 6, pode ser substituído dando um impulso na lata fazendo-a rolar na superfície.

Na próxima seção apresentam-se os questionários utilizados para a validação do produto educacional.

2.5 Questionários Avaliativos (QPo)

A avaliação em relação aos experimentos listados na seção 2.4 e metodologia utilizada para o processo ensino-aprendizagem, consistiu em aplicação de questionários individuais (QPo) respondidos pelos estudantes participantes. O objetivo da aplicação de tais questões relaciona-se com a comparação de respostas dadas às concepções prévias (QPr) e possíveis mudanças de concepções em conceitos desenvolvidos a partir da aplicação das etapas listadas nesta sequência didática. Essas novas percepções adquiridas pelos estudantes podem ser consideradas como uma auto avaliação realizada pelos mesmos de modo que o professor seja o intermediador. Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN's) afirmam que:

A avaliação, apesar de ser responsabilidade do professor, não deve ser considerada função exclusiva dele. Delegá-la aos alunos, em determinados momentos, é uma condição didática necessária para que construam instrumentos de autorregulação para as diferentes aprendizagens. A autoavaliação é uma situação de aprendizagem em que o aluno desenvolve estratégias de análise e interpretação de suas produções e dos diferentes procedimentos para se avaliar. Além desse aprendizado ser, em si, importante, porque é central para a construção da autonomia dos alunos, cumpre o papel de contribuir com a objetividade desejada na avaliação, uma vez que esta só poderá ser construída com a coordenação dos diferentes pontos de vista tanto do aluno quanto do professor.(BRASIL, 2001, p.57.). [Bras01]

Além dos questionários, algumas atividades extras, tais como, resolução de cálculos matemáticos e situações problemas, relacionando a lei de Hooke, confecção de gráficos, em papel milimetrado, e o uso do programa de computador Microsoft Excel ® fazem parte do processo avaliativo embora não substitua a significação de conceitos, bem como a construção de novos conhecimentos adquiridos pelos estudantes.

Os questionários contidos nesta seção foram aplicados aos estudantes após a realização de cada experimento, conforme ilustra o momento de aplicação na Figura 2.10.

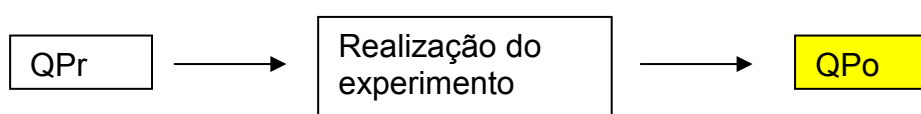


Figura 2.10 - Desenho esquemático indicado o momento em que será aplicado o QPo no contexto da SD. Fonte: o Autor

Assim como na etapa de concepções prévias, os estudantes responderam individualmente as perguntas propostas nessa etapa da SD já que a análise necessária é comparativa às respostas dadas previamente pelos alunos.

Ressalta-se que os questionários avaliativos (QPo) apresentados são diferentes se comparados aos de concepções prévias (QPr). Isso se justifica no fato das questões apresentadas possuírem caráter mais técnico em relação aos primeiros questionários. Outro fator importante a se elencar é o fato das questões serem descritivas. Haja a vista que a proposta seria analisar as respostas dos estudantes de acordo com a concepção de Ausubel – aprendizagem significativa – optamos por utilizar este tipo de questão, pois permite uma gama maior de tipos de respostas (certas ou não) relacionadas a um determinado fenômeno físico a ser difundido na realização da pesquisa.

Os questionários avaliativos estão dispostos nos Quadros 2.11 ao 2.14. O conteúdo desses quadros é um tipo de interpretação dos dados obtidos por meio dos experimentos para atingir o objetivo que cada experimento propõe.

Quadro 2.11 - Questionário Avaliativo 01 (QPo1) aplicado posteriormente à realização do Experimento 01. Fonte: o autor.

QPo1 - Lei de Hooke – Método estático.

- O que aconteceu com os valores de ΔL , à medida que F aumentou?
- Confeccione numa folha de papel milimetrado (Figura 2.11) o gráfico da força F em função do deslocamento ΔL , causada por essa força.

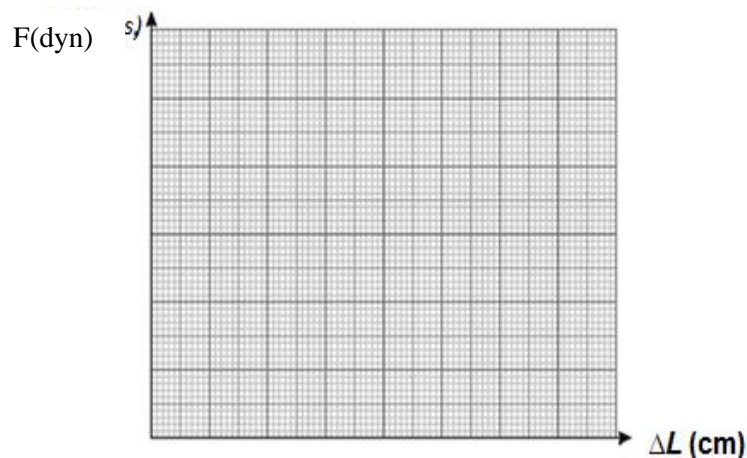


Figura 2.11 - Gráfico da força ($F = P$) em dinas (dyn) versus a variação de distensão da mola (ΔL) medida em centímetros (cm). FONTE: o autor.

- c) Qual é a relação existente entre F e ΔL ?
- d) Sendo uma relação linear entre F e ΔL , trace uma reta média entre os pontos experimentais obtidos e determine o coeficiente angular dessa reta com suas respectivas unidades.
- e) Sendo uma relação linear entre F e ΔL , trace uma reta média entre os pontos experimentais obtidos e determine o coeficiente linear dessa reta.
- f) Qual é o significado físico dos coeficientes angular e linear obtidos nos itens “d” e “e”?
- g) A mola ultrapassou o limite de elasticidade? O que seria esse limite de elasticidade?
- h) Os resultados obtidos comprovam a lei de Hooke? Em caso afirmativo, enuncie a lei.

Quadro 2.12: Questionário Avaliativo 02 (QPo2) aplicado após a realização do Exp. 02. Fonte: o autor.

QPo2 - Lei de Hooke – método dinâmico

- a) Determine a constante elástica, utilizando-se do processo dinâmico (lembrando-se que se trata de movimento oscilatório).
- b) O valor de k obtido foi o mesmo em relação ao que o grupo conseguiu no processo estático?
- c) A mola ultrapassou o limite de elasticidade? O que seria esse limite de elasticidade?
- d) Os resultados obtidos comprovam a lei de Hooke? Como pode afirmar isso?
- e) Quais foram as dificuldades e facilidades que você pode apontar na realização deste experimento?

Quadro 2.13 - Questionário Avaliativo 03 (QPo3) aplicado após a realização do Exp. 03. Fonte: o autor.

QPo3 - Lei de Hooke – Associação de molas em série e em paralelo.

- a) Calcular o valor da constante elástica (experimental) da associação em série.
- b) Calcular o valor da constante elástica (experimental) da associação em paralelo.
- c) Destacar as principais diferenças entre a associação de molas helicoidais em série e em paralelo.
- d) Confeccionar o gráfico que relaciona a força peso da associação em série

versus o deslocamento, de preferência em papel milimetrado (Figura 2.12). Para isso utilize os dados da Tabela 2.3 referente ao Exp. 03 – série.

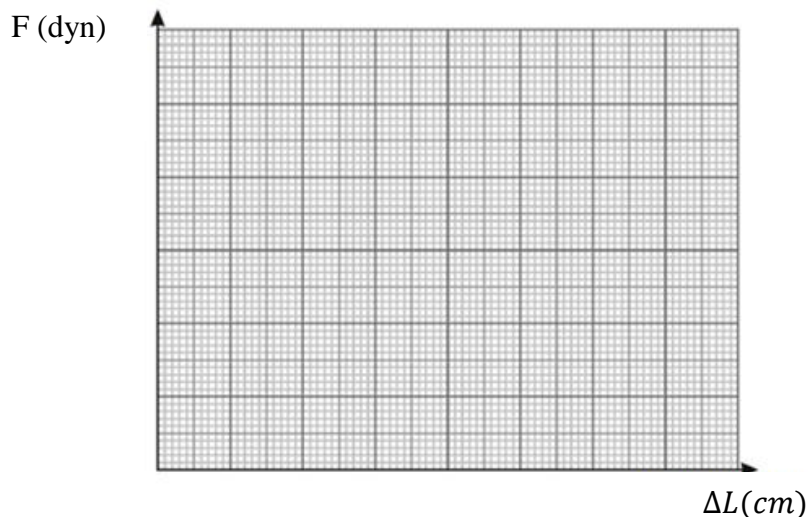


Figura 2.12 - Gráfico da força peso (F) em dinas (dyn) da associação de duas molas iguais em série versus o deslocamento (ΔL) cm. FONTE: o autor.

- e) Confeccionar o gráfico que relaciona a força peso da associação em paralelo versus o deslocamento, de preferência em papel milimetrado (Figura 2.13). Para isso utilize os dados da Tabela 2.4 referente ao Exp. 03 – paralelo.



Figura 2.13 - Gráfico da força peso (F) em dinas (dyn) da associação de duas molas iguais em paralelo versus o deslocamento (ΔL) cm. FONTE: o autor.

- f) A partir da confecção dos gráficos, indique o valor numérico dos quocientes

de uma única mola e de ambas as associações que correspondem à inclinação dos gráficos. E, compare os resultados quando obtidos por meio das equações, complete a Tabela 2.7.

Tabela 2.7. Valores das constantes elásticas obtidas por meio das Equações e considerando a média dos valores e (b) por meio da inclinação das retas dos gráficos.

	Caso estático			Caso Dinâmico		
	1 mola	Molas em série	Molas em Paralelo	1 mola	Molas em série	Molas em Paralelo
	k_1 (dyn/cm)	k_s (dyn/cm)	k_p (dyn/cm)	k_1 (dyn/cm)	k_s (dyn/cm)	k_p (dyn/cm)
Equação/Teoria						
Equação/Média						
Gráfico (reta ajustada)						
D _% (%)						

- g) Relate as principais dificuldades encontradas na realização do experimento.
h) Relate também as suas considerações favoráveis em relação ao experimento.

Sugestão:

- (a) Confeccionar os três gráficos em uma única figura e comparar a inclinação das retas. Utilizar os dados das Tabelas 2.1, 2.3 e 2.4.

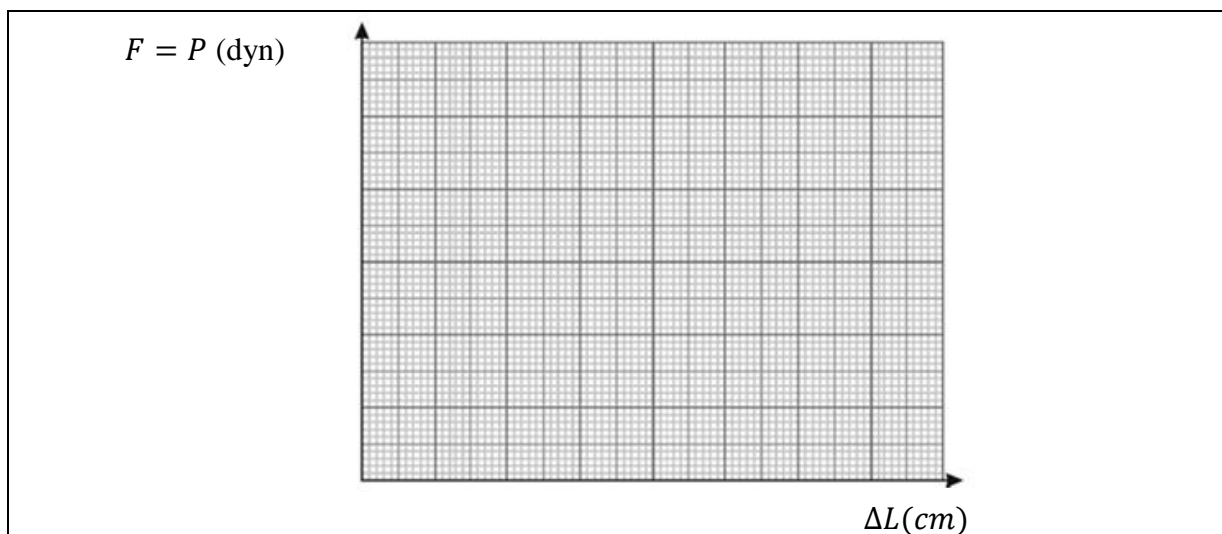


Figura 2.14 - Gráfico da parte estática da força peso ($F=P$) em dinas (dyn) versus o deslocamento (ΔL) cm para uma mola (mola 1), e as configurações em série e em paralelo para duas molas iguais a mola 1. Confeccionado com os dados da Tabela 2.1, 2.3 e 2.4. FONTE: o autor.

(b) Comparar os períodos do movimento oscilatório.

Complete a Tabela 2.8, e analise os resultados.

Tabela 2.8 – Dados dos períodos médios para cada sistema massa-mola: mola de cm e diâmetro de cm e massa de g. Extraídos das Tabelas 2.4; 2.5 e 2.6. Fonte: o autor.

Configuração	Período médio: T_m (s)	
1 mola	T_1 (s)	
Molas série	T_s (s)	
Molas paralelo	T_p (s)	

Quadro 2.14 - Questionário Avaliativo 04 (QPo4) aplicado após a realização do Exp. 04. Fonte: o autor.

QP04: Conservação de Energia Mecânica e Armazenamento de Energia Potencial Elástica– O curioso caso da “lata energética”.

- Qual a função, da lata/recipiente, do elástico e do parafuso com a porca?
- Que tipos de transformação de energia estão envolvidos no comportamento da lata/recipiente nas duas situações (quando rodada na superfície horizontal e quando colocada na rampa)?
- Que modificações você propõe para que a lata/recipiente atinja maior alcance ao ser rodada na superfície horizontal?
- É possível substituir o elástico retorcido por uma mola helicoidal? O sistema

funcionaria da mesma forma?

- e) Descreva o processo realizado para fazer a lata/recipiente rolar.
- f) Com base em sua resposta no item “e”, quais transformações de energia ocorrem nesse caso?

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÕES

As concepções prévias relatadas pelos estudantes, bem como, suas respostas posteriores à realização de cada etapa desta sequência didática quando comparadas espera-se que remeta a uma mudança de concepções ou reformulação de conceitos acerca dos conteúdos conceituais propostos.

Analisando parte de nossos objetivos, que se evidencia a determinar a constante elástica de uma mola helicoidal e analisar a lei de conservação de energia é válido relacionar conceitos físicos com os matemáticos (presentes nos cálculos, confecção de gráficos, determinação de coeficientes angulares, entre outros). Tal interdisciplinaridade deverá ser realizada de modo a demonstrar aos alunos que duas componentes curriculares se correlacionam a fim de explicar fisicamente e matematicamente um fenômeno físico. A proposta de trabalho interdisciplinar evidencia-se nas Diretrizes Curriculares do Estado do Paraná.

Interdisciplinaridade é uma questão epistemológica e está na abordagem teórica e conceitual dada ao conteúdo em estudo, concretizando-se na articulação das disciplinas cujos conceitos, teorias e práticas enriquecem a compreensão desse conteúdo. (Paraná, 2008, p.27.) [ParFis08]

O professor ao analisar as respostas dadas por seus alunos deve estar atento às respostas prévias e as reformuladas pelos mesmos a fim de analisar mudanças de paradigmas, ou seja, transformar conhecimento de senso comum em científico. Nesta perspectiva, a aprendizagem significativa do estudante prevalece como norteadora da assimilação dos conceitos físicos apresentados na SD.

Dividimos a apresentação deste capítulo nos resultados e sua análise em 4 ETAPAS, uma para cada atividade realizada:

- Etapa 01: lei de Hooke - método estático;
- Etapa 02: Lei de Hooke – método dinâmico;
- Etapa 03: Lei de Hooke – molas em série e em paralelo – estático e/ou dinâmico;
- Etapa 04: Lata energética – Armazenamento de Energia Potencial e Conservação de energia.

3.1 Etapa 01 - Lei de Hooke – Método Estático

Nesta subseção, serão apresentados os resultados e as análises referentes às respostas do questionário prévio (Qpr1) – Quadro 01 – seguidas dos resultados e avaliação referente ao Exp. 01 (Quadro 2.6) juntamente com a análise das respostas do questionário avaliativo aplicado posteriormente a realização do experimento 01 (QPo1).

3.1.1 Análise das respostas do Questionário 01 - Concepções prévias (QPr1)

O questionário foi respondido de maneira individual, sem consulta aos materiais didáticos, bem como, sem nenhum auxílio entre colegas e/ou professor. Até mesmo o tema da aula somente foi revelado após a entrega de todos os questionários respondidos. O intuito dessa ação deu-se pelo fato de que os estudantes precisariam responder aquilo que realmente sabiam (conhecimento prévio) ou não sobre termos relacionados à SD, tais como, elasticidade, materiais deformáveis e indeformáveis, constante elástica, sistema massa-mola, lei de Hooke e conservação de energia mecânica relacionada ao armazenamento de energia potencial elástica.

No geral, os estudantes que participaram da pesquisa entendem (ainda que informalmente) o conceito de elasticidade. Percebe-se que na maioria dos questionários respondidos, o termo elasticidade é definido e associado a algum objeto, sendo na maioria dos casos, um elástico. Mas ainda houve a citação de outros objetos, tais como, borracha, fios, plásticos e molas. O termo elasticidade para 05 (cinco) estudantes está relacionado de forma mais simplória como algo que “estica e volta”. Para um aluno dentre os vinte e nove participantes este termo é uma propriedade dos materiais. Frisamos que os estudantes que responderam em qualquer uma das perguntas o termo “Não sei” não foram utilizados na análise sistêmica uma vez que não demonstraram nenhum conhecimento prévio. Esse tipo de resposta pode ter sido dado por entre outros aspectos ao fato do desinteresse ou falta de estímulo acerca da atividade proposta.

Para o estudante 09 o termo elasticidade está associado com a propriedade de certos materiais citando ainda que a propriedade destes materiais em retomar

sua forma ou estado inicial. A Figura 3.1 apresenta na íntegra a resposta dada pelo estudante acerca dessa pergunta.

Nº.: 09 Série: 1º B Data: / / 2018

CONCEPÇÕES PRÉVIAS

LEI DE HOOKE - CASO ESTÁTICO

01. O que você entende por elasticidade?

A elasticidade define-se como sendo a propriedade que certos materiais apresentam de serem capazes de recuperar a sua forma e estado inicial.

Figura 3.1 - Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 09 à questão 01 - QPr1. Transcrição da resposta: “A elasticidade define-se como sendo a propriedade que certos materiais apresentam de serem capazes de recuperar a sua forma e estado inicial”. FONTE: estudante 09 e arquivo do autor.

Já o estudante 15 entende o termo elasticidade comparando-o a um exemplo de seu cotidiano, neste caso o uso de calças com elástico. A resposta dada pelo estudante em questão é simples, mas este soube associar o termo elasticidade com algo que faz parte de seu dia a dia. Esta resposta prévia tem extrema importância conforme Florentino (2004, p.153): “os conhecimentos derivados da primeira leitura de mundo por parte dos indivíduos, e da necessidade que os indivíduos têm de responder e resolver os problemas do cotidiano”. [Flor04]

Dessa forma, o fato de ter mencionado a calça com elástico mostra que o estudante fez uma correlação do tema com um exemplo presente em seu cotidiano onde este observa a aplicabilidade da propriedade em questão. A Figura 3.2 mostra a resposta descrita pelo estudante.

Nº.: 15 Série: [REDACTED] 1º B Data: / / 2018

CONCEPÇÕES PRÉVIAS

LEI DE HOOKE - CASO ESTÁTICO

01. O que você entende por elasticidade?

Eu entendo que é tudo que pode esticar elástico ou uma calça que você puxa e ela solta.

Figura 3.2 - Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 15 à questão 01 – QPr1. Transcrição da resposta: “Eu entendo que é [SIC] tudo que pode esticar elástico [SIC] ou uma calça [SIC] que você puxa e ela solta”. FONTE: estudante 15, e arquivo do autor.

O estudante 29 explica o termo elasticidade associando o mesmo com a atuação de forças. Embora não fique tão clara na resposta, como mostra a Figura 3.3, o estudante relaciona a elasticidade supostamente com as Leis de Newton (força), sendo estas mais conhecidas do aluno em geral devido a importância para a Física Clássica.

Nº.: 29 Série: 126 Data: ___/___/2018

CONCEPÇÕES PRÉVIAS

LEI DE HOOKE - CASO ESTÁTICO

01. O que você entende por elasticidade?

Uma coisa que estica e volta, desaparece com a retirada das forças que a originaram.

Figura 3.3 - Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 29 à pergunta 01 - QPr1. Transcrição: “Uma coisa que estica e volta, desaparece com a retirada das forças que a originaram.” FONTE: estudante 29, e arquivo do autor.

O estudante 10 também atribuiu ao termo força o fato de haver “deformação” em materiais com a propriedade de esticar-se ou contrair-se (Figura 3.4). Embora que incompleta e pouco satisfatória a resposta do aluno em questão, demonstra que o mesmo realizou uma conexão, ainda que simplória, com o conteúdo Leis de Newton. O mesmo ainda tenta definir a elasticidade de um corpo associando a ela um conceito mais conhecido que é o termo força.

Nº.: 10 Série: 126 Data: ___/___/2018

CONCEPÇÕES PRÉVIAS

LEI DE HOOKE - CASO ESTÁTICO

01. O que você entende por elasticidade?

Materiais que quando sofrem deformação por uma força, se retirado o material volta ao seu formato original.

Figura 3.4 – Imagem Fotográfica da resposta prévia do estudante 10 à pergunta 01 – QPr1. Transcrição da resposta: “Materiais que quando sofrem deformação por uma força, se retirado o material volta [sic] ao seu formato original”. FONTE: estudante 10 e arquivo do autor.

Os alunos 29 e 10 demonstram em suas respostas prévias o proposto por Ausubel definido como subsunçores. Esta evidência implica-se ao fato dos mesmos utilizarem o termo força como uma “ponte” para responder o que seria elasticidade atribuindo autonomia ao aluno na construção de um novo conceito a partir de suas concepções prévias. Além disso, os subsunçores não precisam ser respostas bem elaboradas. Em outras palavras:

Isto significa dizer que os subsunçores existentes na estrutura cognitiva podem ser abrangentes e bem desenvolvidos, ou limitados e pouco desenvolvidos, dependendo da frequência com que ocorre a aprendizagem significativa em conjunção com um dado subsunçor. (Moreira, 2011, p.165).
[Mor99]

Para o estudante 22, elasticidade também se associa a força e a “deformação” de um corpo (Figura 3.5). O que evidencia-se na resposta prévia é a utilização de “forças exercidas”. Outra percepção é o fato do estudante não definir o que seria um sistema elástico, mas a evidencia de que tal sistema pode sofrer “deformação”.

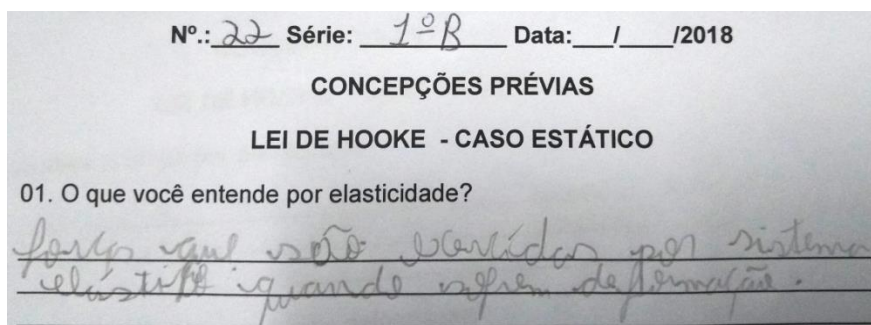


Figura 3.5 – Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 10 à questão 01 – QPr1. Transcrição da resposta: “forças que são exercidas por sistema elástico quando sofrem deformação”. FONTE: estudante 22 e arquivo do autor.

As demais questões prévias propostas pelo Questionário 01 possuíram as mais diferentes respostas. Em uma análise geral é possível verificar que os estudantes associam a deformação elástica de um material a algum tipo de força que eles também não sabem definir o que seja ou de onde venha. Apenas citam demonstrando pouco domínio desse conceito físico. Temas como “Lei de Hooke” e “constante elástica” foram respondidos superficialmente ou então, nem respondidos demonstrando falta de clareza ou até mesmo o não desenvolvimento ou

aprofundamento desses conceitos no Ensino Fundamental na componente curricular Ciências.

De acordo com as Diretrizes Curriculares do Estado do Paraná (DCE's) para o ensino de Ciências o professor desta componente curricular, no ensino fundamental precisa realizar um trabalho interdisciplinar buscando uma melhor atuação do aluno.

Em Ciências, as relações interdisciplinares podem ocorrer quando o professor busca, nos conteúdos específicos de outras disciplinas, contribuições para o entendimento do objeto de estudo de Ciências, o conhecimento científico resultante da investigação da Natureza. (PARANÁ, 2008, p.74). [ParCiê08]

A falta de clareza e de definições mais precisas apresentadas demonstra uma fragmentação no ensino de Física, que na maioria das vezes é desfalcado em relação aos termos e conceitos que deveriam ser desenvolvidos. As DCE's para Ciências do Ensino Fundamental apresentam em seu *rol* de competências e habilidades, o conteúdo estruturante dessa componente curricular denominado Energia. Este conteúdo estruturante está presente nos quatro anos finais do Ensino Fundamental (do 6º ao 9º ano). Cabe ao professor saber respeitar cada etapa/série para poder desenvolver bem seu trabalho acerca dos conteúdos básicos e específicos propostos como “ramificações” de Energia. [ParCiê08] O professor deve realizar as adaptações necessárias para cada etapa/ano respeitando o processo cognitivo de seus educandos.

Nas respostas prévias no questionário 01 dadas pelos estudantes desconsiderando a falta de interesse em determinados assuntos de Física, o termo conservação de energia fora respondido por apenas quatro estudantes. O gráfico da Figura 3.6 apresenta o resultado obtido da análise das respostas referente à questão: 06 - **Como você relacionaria um sistema massa-mola com a conservação de energia?**

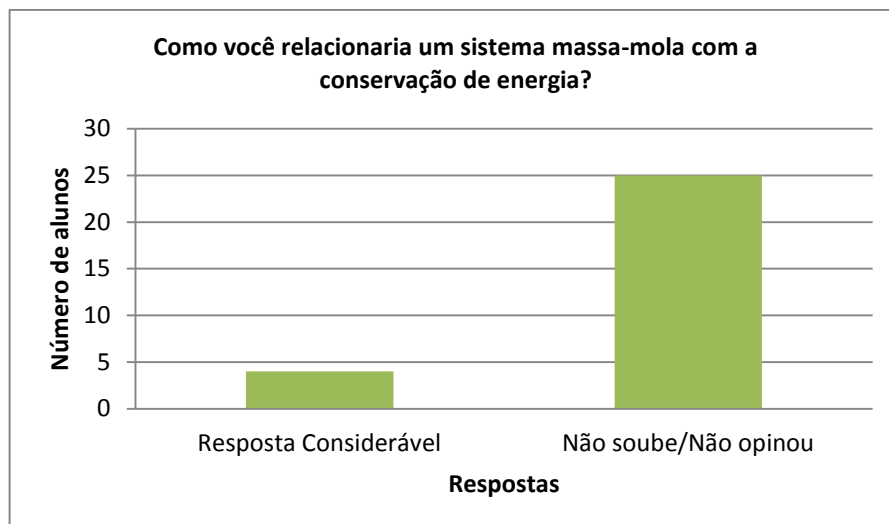


Figura 3.6 - Gráfico do número de alunos pela análise das respostas dos estudantes à questão 06 do questionário QPr1. FONTE: o autor.

Pôde-se observar que vinte e cinco alunos não compreendem e nem relacionam um sistema massa-mola com a conservação de energia. Dentre os vinte e nove participantes, apenas quatro alunos responderam esta pergunta. Ainda que erroneamente, tivemos como respostas:

- O estudante 12 descreve em sua resposta que a conservação de energia em uma mola está ligada ao fato da mesma realizar um movimento de “vai e volta” informando ainda que uma mola conserva⁴² e libera energia. A Figura 3.7 a apresenta a resposta na íntegra.

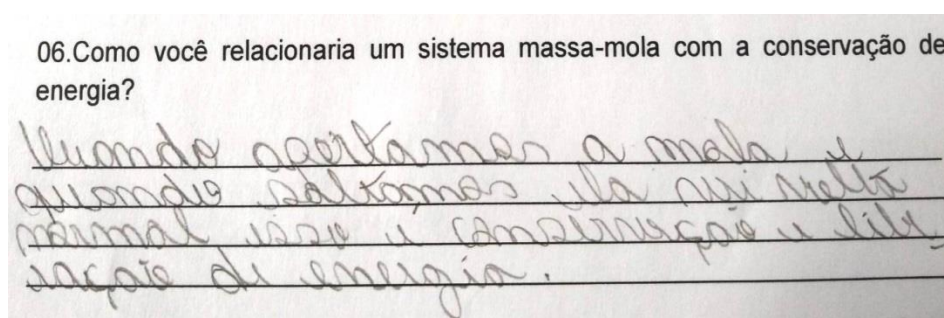


Figura 3.7 - Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 12 acerca da questão 06 (QPr1). Transcrição: “Quando apertamos a mola e soltamos ela vai volta normal isso é conservação e liberação de energia”. FONTE: estudante 12 e arquivo do autor.

A mola ao ser distendida após a aplicação de uma força externa e a relação desta com a conservação de energia foi exemplificada na resposta do aluno 11

⁴² O correto seria armazena, no caso armazena energia.

(Figura 3.8): para ele a conservação de energia em uma mola está relacionada à sua distensão, podendo a mola sempre voltar ao seu estado inicial.

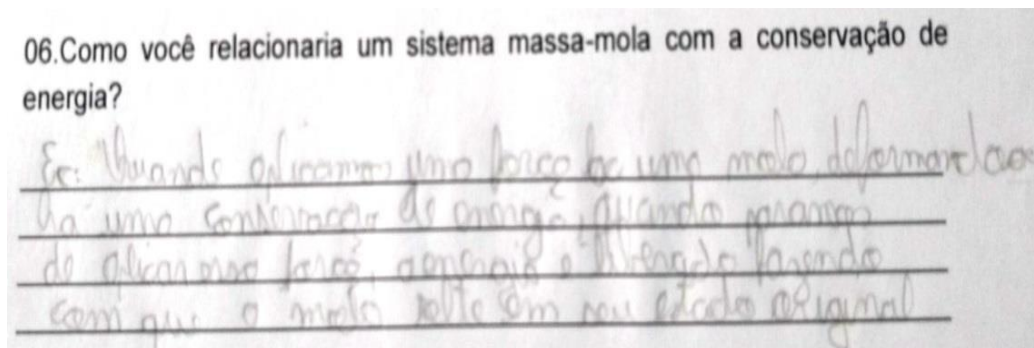


Figura 3.8 - Imagem fotográfica da resposta prévia do estudante 11 acerca da questão 06 (QPr1). Transcrição: “Ex.: Quando aplicamos uma força a uma mola, deformando há uma conservação de energia, quando paramos de aplicar essa força, a energia é liberada fazendo com que a mola volte em seu estado original”. FONTE: autor e estudante 11.

Uma análise geral realizada no Questionário prévio ao Experimento 01 (QPr1) desta SD - **Determinação da constante elástica de uma mola – modo estático** nos permitiu diagnosticar, ainda que temporariamente, que há falta de construção e assimilação de conceitos físicos básicos, tais como o conceito de força. É evidente nas respostas obtidas por meio da aplicação desse questionário que os estudantes apresentam defasagem acentuada nos conteúdos de Física desenvolvidos na componente curricular Ciências para os anos finais do Ensino Fundamental. Além disso, como já mencionado neste trabalho, percebeu-se que alguns alunos mostraram-se desinteressados em responder os questionários. Esse desinteresse pode estar associado à falta de conhecimento prévio e/ou ao fato do estudante não saber relacionar os conteúdos desenvolvidos em sala de aula com seu cotidiano.

3.1.2 Exp. 01 - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal no método estático e Análise do QPo2.

Distribuídos em grupos com até 05 (cinco) alunos, realizou-se a aplicação do Exp. 01. Tal aplicação ocorreu no laboratório de Ciências do Colégio Estadual Antonio Tortato – Ensino Médio e Normal. Com relação ao laboratório, ainda que precário em alguns aspectos possui uma boa estrutura e dispõe de materiais diversos para o desenvolvimento de atividades práticas. Apresentamos uma foto do laboratório deste estabelecimento de ensino na Figura 3.9.



Figura 3.9: Imagem fotográfica do laboratório de Ciências (Física, Química e Biologia) do Colégio Estadual Antonio Tortato (CEAT). FONTE: acervo – CEAT.

Para a realização do experimento os grupos seguiram o roteiro proposto na seção 2.4 (Exp. 01) intitulado **Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal – método estático** sendo este experimento adaptação da atividade experimental de oscilações mecânicas do Manual de Laboratório de Física Experimental II do Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá (UEM) cujo texto⁴³ é de Hatsumi Mukai e Paulo Ricardo G. Fernandes.

Aos grupos foi distribuída uma mola helicoidal de diferentes diâmetros. Frisamos que as molas não possuíam suas constantes elásticas informadas no *kit* o que dificultou a comparação de resultados. Nesta perspectiva os alunos tiveram que determinar a constante elástica utilizando os meios experimentais disponíveis no roteiro da prática. Os alunos foram orientados pelo professor a seguirem os comandos do roteiro no intuito de evitar erros inerentes às práticas experimentais, tais como: erros de medidas, erros relacionados à observação, dentre outros.

A montagem do experimento para a realização da prática feita pelos grupos sob a orientação do professor justifica-se no fato de ser necessário criar materiais potencialmente significativos para que ocorra uma aprendizagem significativa, ou

⁴³ O experimento em si, foi uma proposta feita antes de 1995, pelo Prof. Me. Arlindo Antonio Savi (aposentado do DFI) e demais professores que ministravam a disciplina de Física Experimental I.

seja, uma mudança de concepção eficiente, neste caso de um conteúdo físico. Conforme o exposto por Moreira (2012):

Uma das condições para a ocorrência da aprendizagem significativa, portanto, é que o material a ser aprendido seja relacionável (ou incorporável) à estrutura cognitiva do aprendiz, de maneira não arbitrária e não literal. [...] Essa condição implica não só que o material seja suficientemente não arbitrário em si, de modo que possa ser aprendido, mas também o aprendiz tenha disponível em sua estrutura cognitiva os subsunçores adequados. (MOREIRA, 2012, p.164). [Mor12]

A Figura 3.10 apresenta o registro de um dos grupos de alunos realizando a prática proposta. Orientados pelo professor os estudantes seguiram as etapas 1 a 9 do texto de apoio descrito na seção 2.4 – Exp.01.



Figura 3.10 - Imagem fotográfica registrado do grupo de estudantes realizando o Exp. 01. FONTE: arquivo do autor.

Uma das etapas do experimento “Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal – caso estático” era a anotação dos dados obtidos, tais como, a massa total utilizada (que nesse caso já haviam sido previamente definidas e aferidas: 60 g, 80g, 100 g, 120 g e 140 g). Além disso, uma das etapas seria verificar a distensão ΔL graduada em centímetro (cm) sofrida pela mola ao ter acoplada a ela estas massas. Destacamos ainda a substituição do gancho suporte proposto inicialmente no roteiro por fio de *nylon* uma vez que os estudantes poderiam considerar a massa deste fio como desprezível.

Tendo em mãos os dados: massa total m_T e considerando a aceleração gravitacional $g = 980 \text{ cm/s}^2$ os grupos calcularam a força peso atuante em cada uma das massas ou de cada conjunto de massas suspensas. Para a realização dos cálculos matemáticos os estudantes tiveram o auxílio de calculadora para que os mesmos fossem realizados mais rapidamente.

Um ponto a ser considerado na aplicação deste PE fora o fato dos estudantes utilizarem unidades de medida pouco usuais para o Ensino Médio. Esse foi em C.G.S. em que representa por dinas⁴⁴ (dyn) a força e, a aceleração gravitacional em centímetros por segundo ao quadrado (cm/s^2) e não em metros por segundo ao quadrado (m/s^2). O objetivo dessa troca deu-se pelo fato de que essas unidades são pouco usuais nesta etapa de ensino, uma vez que o uso de unidades padrões, conforme o Sistema Internacional de Unidades (SI) poderia remeter a ideia de que as grandezas força e aceleração gravitacional provêm de apenas uma unidade padrão, desconsiderando-se seus múltiplos ou submúltiplos.

O grupo formado pelos alunos 05, 06, 08, 13 e 25 da turma 01 (Grupo A) demonstrou empenho na realização das etapas propostas por meio do texto de apoio. Os cinco estudantes estiveram sempre a postos e realizaram de forma caprichada a parte experimental que lhes fora sugerida. Este grupo utilizou um gancho suporte de 9 g (valor que foi adicionada às massas a serem suspensas). Este grupo obteve um gráfico, no Microsoft Excel 2010, reproduzido na íntegra e apresentado pela Figura 3.11.

Os grupos não só confeccionaram o gráfico obtido por suas respectivas molas em modo estático utilizando o Excel 2010® como também o fizeram utilizando o papel milimetrado.

⁴⁴ A dina é a força que comunica a massa de 1g a aceleração de 1 cm/s^2 , ou seja: $1 \text{ dyn} = 1 \text{ g cm/s}^2 = 10^{-3} \text{ kg} \cdot 10^{-2} \text{ m/s}^2 = 10^{-5} \text{ N}$.

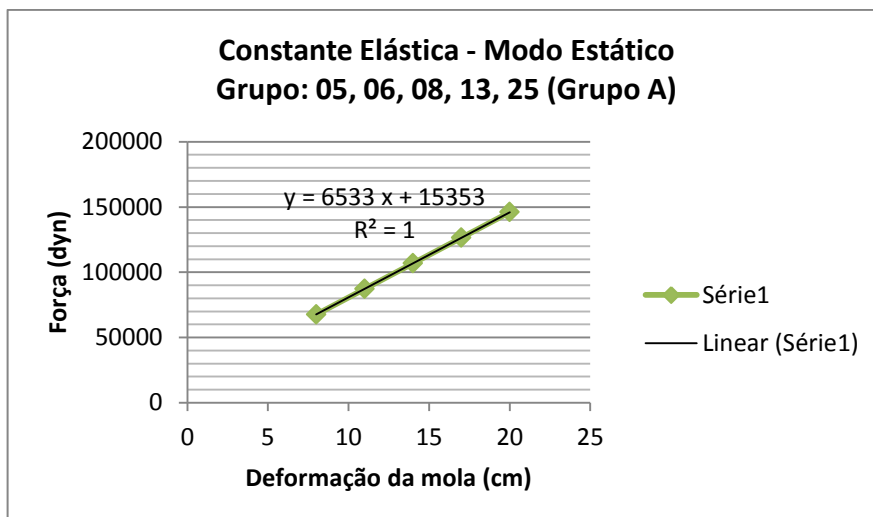


Figura 3.11 - Gráfico da magnitude da Força $F = P$ (dyn) em função do deslocamento ΔL (cm), confeccionado com os dados da Tabela 2.7 (após preenchida pelo grupo), confeccionado com o auxílio do Microsoft Excel 2010. Os símbolos quadrados representam os dados experimentais e a reta em verde a reta ajustada, $F = P = 6533 \Delta L + 15353$, pelo método dos mínimos quadrados. FONTE: autor e grupo A.

A Figura 3.12 apresenta o gráfico da Figura 3.11 só que agora utilizando-se de recursos mais básicos como a régua, lápis e o papel milimetrado.

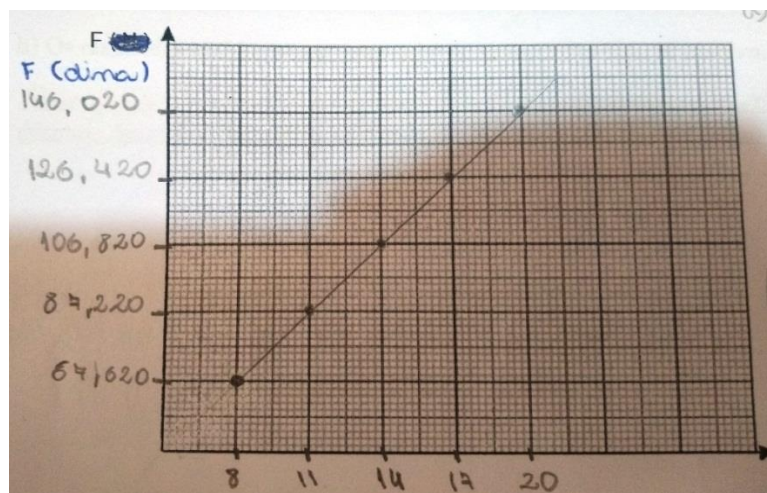


Figura 3.12 - Imagem fotográfica do Gráfico da força, $F = P$ (dinas), em função do deslocamento, ΔL (cm), a partir dos dados da Tabela 2.7 (após preenchida pelo grupo), confeccionado manualmente pelos alunos integrantes do Grupo A. Os símbolos quadrados representam os dados experimentais e a reta é a reta média. FONTE: autor e grupo A.

É perceptível que os estudantes, conforme apresenta a Figura 3.12, não obedecem a uma escala em seu gráfico, ficando nítida a igualdade de distância entre os pontos localizados no eixo x (ΔL da mola) e no eixo y (Força, determinada em dyn). Isso também fora observado em outros grupos. Na confecção dos gráficos os estudantes não respeitaram uma escala adequada, ainda que diferentes obtidas

para cada ponto a partir da realização do experimento proposto. O fato de terem obtido uma reta, foi devido à proporcionalidade entre a força e o deslocamento ser linear, bem como a divisão do papel milimetrado.

Na escala adotada de 50 mm para o eixo das ordenadas, os valores da força lá apresentados deveriam estar posicionados em: 23, 30, 36, 43, e 50 mm, respectivamente. E, para o eixo das abscissas, os valores do deslocamento deveriam estar posicionados em: 24, 33, 42, 51 e 60 mm, respectivamente.

Sobre a utilização de gráficos pode-se esclarecer que os mesmos servem para que haja a interdisciplinaridade entre a Física e a Matemática no que diz respeito à quantificação de dados. Conforme afirmam Peixoto e Cruz (2011, p.126) os gráficos devem fazer parte do processo ensino – aprendizagem como um elemento prático de ensino e de fácil entendimento.

O gráfico não deve ser visto como uma representação exclusiva da Estatística, muito menos da Matemática e Geografia. Sua utilização ultrapassa as barreiras da interdisciplinaridade, sendo este um recurso muito utilizado para quantificar as diferentes pesquisas das mais diferentes ciências. Esse recurso tem como objetivo integrar a imagem e a informação na busca da resposta sintetizada, pretendendo-se uma comunicação rápida. Por ser um elemento que possibilita sua aplicação como instrumento interdisciplinar torna-se factível em todas as disciplinas. (PEIXOTO e CRUZ, 2011, p.126). [Peix11]

Além disso, a leitura e interpretação de gráficos torna-se importante quando relacionamos a Física e a Matemática. É cabível ressaltar que essa aproximação de ambas componentes curriculares não deve servir apenas de “pretexto” para o professor de Física “matematizar” sua disciplina e nem do professor de Matemática em contextualizar por contextualizar o ensino matemático. A compreensão de conceitos fundamentais da Física para estudantes do Ensino Médio torna-se imprescindível para a interdisciplinaridade de ambas as componentes curriculares. Carvalho (*et al*, 2010) reafirma o exposto dando ênfase ao ensino interdisciplinar:

Transpondo ao ensino de Física do Ensino Médio, entender conceitos físicos básicos, em muitas ocasiões, demandará dos estudantes compreender de que maneira foi possível propor as relações entre as variáveis do mundo natural. Assim, tão importante quanto saber os conceitos é compreender de que modo eles se estruturam tal como propostos. E a proximidade entre a Matemática e a Física, tradicionalmente trabalhada apenas pelo viés da operacionalização de exercícios didáticos, manifesta-se como uma possibilidade real durante a construção destes conceitos pelos estudantes: a leitura de tabelas e gráficos para posterior compreensão de fórmulas. (Carvalho *et al*, 2010, p. 17). [Carv10]

Nenhum grupo ao confeccionar os gráficos no papel milimetrado obedeceu a elementos como, por exemplo, a utilização de escalas uma vez que, tanto no eixo das abscissas como no eixo das ordenadas os grupos mantiveram a mesma distância entre os pontos, independentemente se esses a tinham ou não. Esse erro conceitual na confecção dos gráficos só pode ser observado pelos estudantes quando os mesmos realizaram a confecção desses com a utilização do programa Microsoft Excel 2010® e puderam realizar a comparação de seus gráficos. A Figura 3.13 apresenta uma foto dos estudantes utilizando o laboratório de informática do CEAT para a confecção de seus respectivos gráficos.



Figura 3.13 - Registro dos estudantes confeccionando gráficos utilizando o programa do Microsoft Excel 2010® no laboratório de informática do CEAT. FONTE: o autor.

Conceitos matemáticos como coeficiente linear e coeficiente angular só puderam ser determinados pelos grupos a partir da confecção computacional dos gráficos. Em se tratando desses conceitos matemáticos os estudantes tiveram dificuldade em relacioná-los com os seus respectivos conceitos físicos. Como no caso, o coeficiente linear representa uma força peso inicial e o coeficiente angular a constante elástica da mola. Entendemos que esta dificuldade possa estar associada à má formação matemática que os estudantes possuem, evidenciada nas dificuldades apresentadas pelos mesmos, bem como, a relação que esses alunos fazem entre conceitos de Física e de Matemática.

Evidenciou-se principalmente, o fato dos estudantes não conseguirem relacionar o coeficiente angular com a constante elástica k presente na equação

matemática proposta por Robert Hooke (1635 – 1703) em 1660, denominada de Lei de Hooke, para o cálculo da força elástica em um sistema massa-mola. Os estudantes também tiveram dificuldade em associar os conceitos físicos com os matemáticos, sendo necessária a revisão do conteúdo função afim⁴⁵ (proposta pelas DCE's para a componente curricular Matemática) de modo que os alunos pudessem se familiarizar com tais conceitos.

Ressalta-se ainda o fato de alguns estudantes, realizarem mais de uma vez os procedimentos listados no Exp. 01; alguns não obtiveram bons resultados. Um dos grupos apresentou o gráfico da Figura 3.14. Esse é um resultado interessante a ser considerado, pois em termos da linearidade deu próximo de 1, somente um ponto ficou fora da reta ajustada.

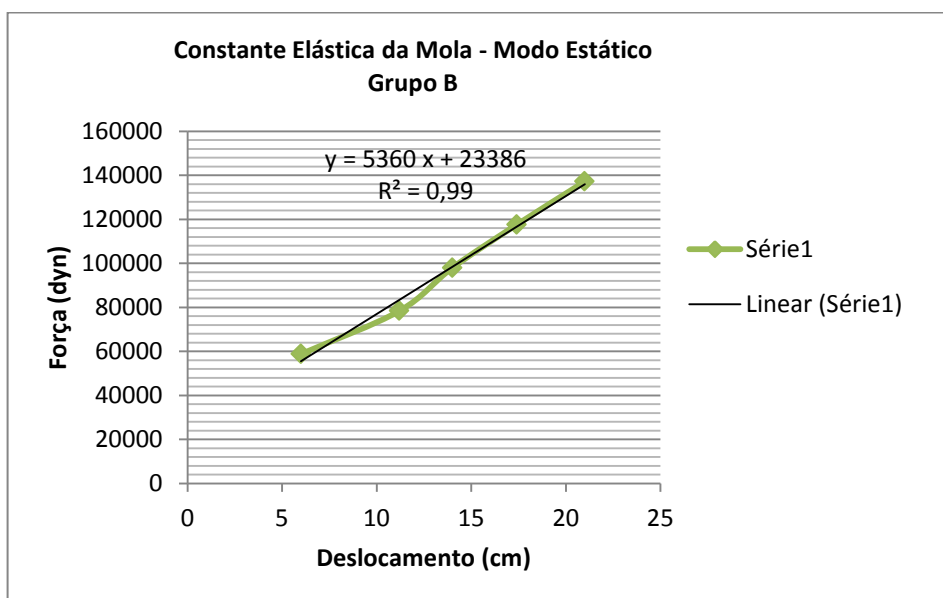


Figura 3.14 - Gráfico do módulo da força peso P (dyn) em função do deslocamento ΔL (cm). O gráfico apresentado pelo Grupo B apresenta um bom ajuste, $R^2 = 0,99 \cong 1$, conforme pode ser verificado nos quadrados em verde em relação da reta de ajuste: $F = P = 5360 \Delta L + 23386$.
FONTE: autor e grupo B.

Essa incoerência no segundo ponto do gráfico apresentado na Figura 3.14 está relacionada com a medida do deslocamento que não acompanhou as demais. Mas também pode ter ocorrido um erro sistemático⁴⁶ nas demais medidas e esse estar correto. A principal dificuldade é o erro de paralaxe, uma vez que como se

⁴⁵ Função de grau 1, do tipo $f(x) = a + b x$, tal que o gráfico $f \times x$, tem como comportamento uma reta não perpendicular ao eixo das abscissas (x).

⁴⁶ Erro sistemático: É o tipo de erro que se repete por algum procedimento de leitura errôneo. Como no caso erro de paralaxe ler sempre da mesma forma e não ser a adequada, por exemplo, mudando quem está realizando a leitura. Esse tipo de erro ocorre sempre no mesmo sentido.

utiliza a observação visual para a obtenção de resultados fica difícil prever um valor exato. Além disso, podem ter se equivocado no cálculo da força peso. Espera-se um resultado próximo a uma reta, no intuito de satisfazer a uma função afim. A não formação de uma curva com característica de uma função afim não dará um valor, exato ou aproximado, da constante elástica da mola helicoidal.

Cabe, nesse sentido, ressaltar a relação destes erros procedimentais com a chamada aprendizagem proposicional de Ausubel. Neste tipo de aprendizagem significativa o importante “não é aprender o significado de conceitos, e sim, o significado de ideias expressas verbalmente por meio desses conceitos sob a forma de uma proposição” (Moreira, 2011 – p. 165) [Mor12]. Nesse sentido, buscou-se então que os estudantes fossem instigados a relatar oralmente os possíveis erros, verificando assim, se os mesmos conseguiriam relacioná-los com o conteúdo que estava sendo desenvolvido.

Já o Grupo C, não obteve bons resultados ao realizar seu experimento, obtendo assim, um gráfico com o valor de r^2 bastante diferente de 1. O gráfico confeccionado por esse grupo é o apresentado na Figura 3.15.

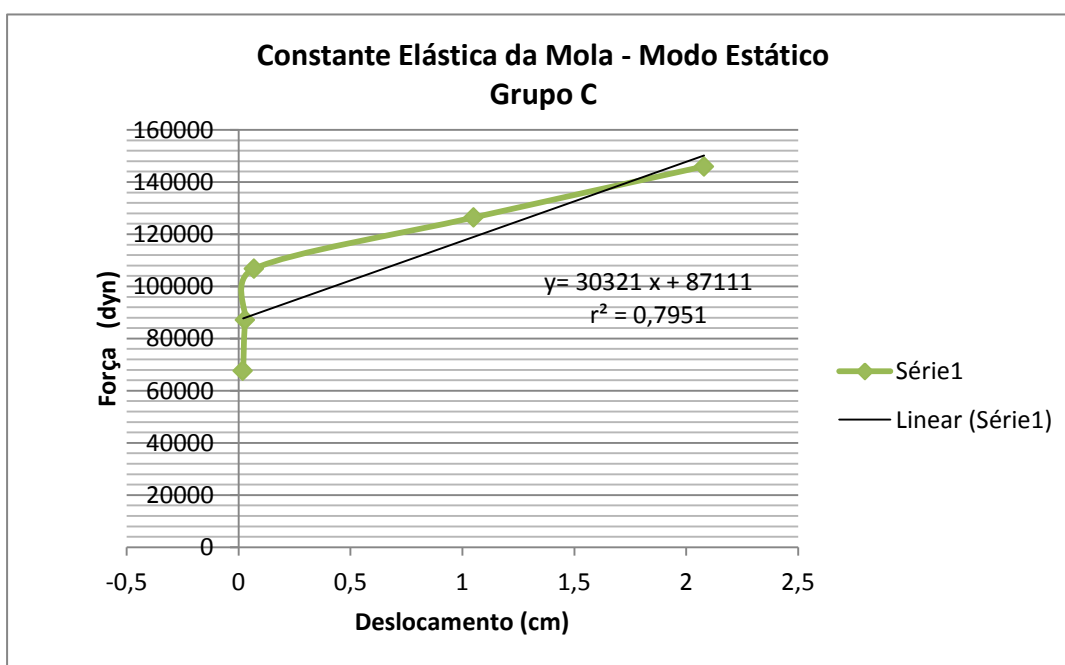


Figura 3.15 - Gráfico do módulo da força peso, $F = P(\text{dyn})$, em função do deslocamento, ΔL (cm). Pode-se notar que o valor de r^2 obtido pelo grupo C não iguala-se, e nem é próximo de 1, apresentando a discrepância entre os pontos em verde (Série1) que são os dados experimentais, ao da reta de ajuste. FONTE: o autor e grupo C.

Pode-se observar no gráfico apresentado na Figura 3.15 que o mesmo possui pontos fora do esperado e proposto na série linear (comportamento de função afim). Os estudantes do grupo quando questionados sobre os possíveis erros procedimentais que levaram a confecção do mesmo (que neste caso não apresenta um valor mais aproximado do exato para a constante elástica, quando comparado com os demais) afirmaram ter realizado todos os procedimentos experimentais propostos de forma a obter valores mais precisos. Embora não tendo apresentado um gráfico satisfatório, o estudante 04 (pertencente ao Grupo C) apresentou uma justificativa considerável conforme consta na Figura 3.16, em que o mesmo respondeu na questão “h” do QPo1: **Os resultados obtidos comprovam a lei de Hooke? Em caso afirmativo, enuncie a lei.**

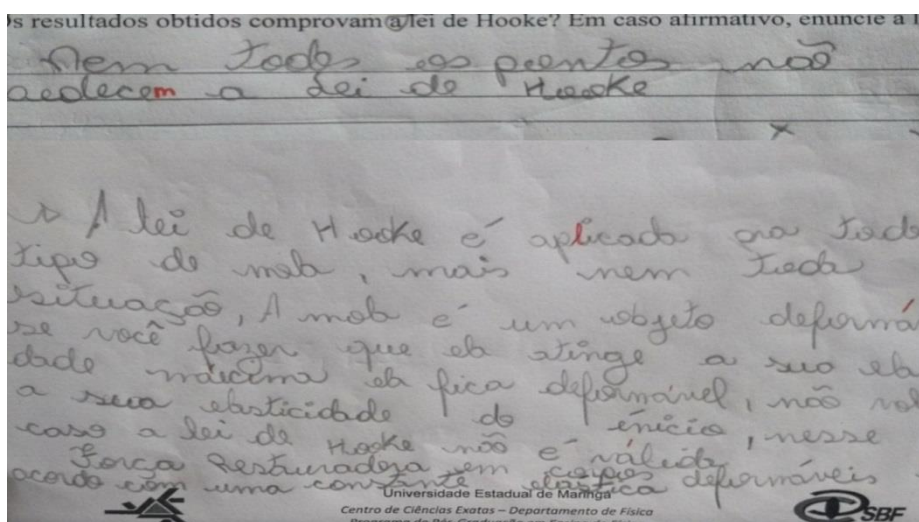


Figura 3.16 – Imagem fotográfica do registro da concepção do estudante 04 (integrante do Grupo C) sobre o fato de não obterem um gráfico satisfatório. Transcrição: “Nem todos os pontos não obedecem [sic] a Lei de Hooke -> A lei de Hooke é aplicada [sic] pra [sic] todo tipo de mola, mais [sic] nem toda situação. A mola é um objeto deformável [sic] se você fazer [sic] que ela atinge [sic] a sua elasticidade máxima ela fica deformável, não volta a sua elasticidade do início, nesse caso a Lei de Hooke não é válida Força restauradora em corpos de acordo com uma constante elástica.” Fonte: estudante 04 (Grupo C) e arquivo do autor.

Cabe ressaltar que neste caso aplica-se a aprendizagem proposicional de Ausubel, uma vez que os alunos demonstraram erro na realização de seu procedimento e, em contrapartida relacionaram os possíveis erros com o conceito da Lei de Hooke a fim de determinar a constante elástica utilizando-se do procedimento estático.

Tendo como base os pressupostos dispostos na análise desse primeiro experimento, podemos ter as seguintes conclusões:

- Os estudantes da primeira série participantes da pesquisa tiveram dificuldades em relacionar os conceitos físicos com os conceitos matemáticos;
- Há uma defasagem de conteúdos nítida nos estudantes. Essa defasagem pode ser atribuída ao que Gerhard e Filho (2012) propõem como fragmentação do conhecimento escolar científico.

A fragmentação do conhecimento científico a ser ensinado manifesta-se na separação das disciplinas na escola, e tem sido danosa para a educação. Até mesmo no contexto de uma dada disciplina o conhecimento é separado em diversos conteúdos relativamente estanques, que são apresentados de maneira desvinculada e desconexa. O resultado da fragmentação do conhecimento a ser ensinado é a perda de sentido, que se manifesta nos alunos como repúdio a determinadas disciplinas, demonstrando que eles não conseguem perceber as semelhanças e relações entre as diferentes áreas do conhecimento. (GERHARD e FILHO, 2012, p.127-128). [Ger12]

A defasagem de conteúdos demonstrada pelos estudantes para a realização do experimento proposto, bem como, o registro de concepções prévias que não demonstraram conhecimentos de conteúdos físicos na maioria dos estudantes, torna mais evidenciado a fragmentação do conhecimento científico destes indivíduos;

- Outra evidência clara na aplicação desta atividade diz respeito ao fato dos estudantes, em sua maioria, possuírem dificuldades em assimilar conceitos físicos importantes, tais como, o conceito de força e a expressão “constante” uma vez que a mesma é um dos objetivos do PE. Percebeu-se que os estudantes têm dificuldade em assimilar o conceito “constante”, no caso da constante elástica, uma vez que para determinação da mesma é necessária a realização fidedigna de procedimentos aos quais os alunos não estão habituados.
- De um modo geral, pode-se ressaltar que embora os estudantes apresentassem essas dificuldades, os mesmos realizaram o experimento e compreenderam o que estava sendo realizado uma vez que todos os grupos pesquisados obtiveram um valor de constante elástica para suas respectivas molas.

A seguir, segue a análise referente às atividades diagnósticas, experimentais e avaliativas envolvendo oscilações mecânicas, Lei de conservação e Lei de Hooke.

3.2 Etapa 02: Lei de Hooke – Método Dinâmico.

Segue a análise do questionário prévio 2, QPr2, aplicado antes da realização do Exp. 02, e a análise da aplicação do Experimento 2 e do questionário avaliativo, aplicado após a realização do experimento, QPo2. A realização desta etapa ocorreu de forma análoga que a Etapa 01: resolução do questionário de concepções prévias com perguntas descritivas (QPr2) (seção 2.3, Quadro 2.3) e realização dos procedimentos experimentais (Exp. 02: **Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal – método dinâmico**) (seção 2.4, Quadro 2.7), além de responder o questionário avaliativo (Quadro 2.11).

3.2.1 Análise das respostas do Questionário 02: Concepções prévias (QPr2)

Nesta etapa, os estudantes registraram em seus questionários o fato de que consideraram difícil determinar a constante elástica (algo que agora já estavam mais acostumados) de uma mola helicoidal a partir de movimentos oscilatórios. Para os estudantes o próprio termo “movimentos oscilatórios” era relativamente novo, uma vez que os mesmos alegaram desconhecer ou conhecer superficialmente tal conceito.

Mais uma vez temos a evidência na fragmentação do Ensino de Ciências, já que de acordo com o Caderno de Expectativas e Aprendizagens⁴⁷ para o componente curricular Ciências propõe-se que nos anos finais do ensino fundamental haja “integração conceitual, ou seja, estabeleça relações tanto conceituais (relações entre os diferentes conteúdos estruturantes) como interdisciplinares e contextuais”. De acordo com Nussenzveig (2002) o termo oscilações não é de difícil entendimento, uma vez que faz parte de nosso cotidiano. Esse informa que:

Oscilações são encontradas em todos os campos da física. Exemplos de sistemas vibratórios incluem pêndulos, diapasões, cordas de instrumentos

⁴⁷O Caderno de Expectativas e Aprendizagens foi formulado coletivamente, de forma participativa no decorrer do ano de 2011 e propõe parâmetros, pautados nas Diretrizes Curriculares Orientadoras do Estado do Paraná, em relação aos conteúdos fundamentais a serem trabalhados com todos os estudantes da Educação Básica da Rede Estadual, independente da região onde estes se encontram.

musicais e colunas de ar em instrumentos de sopor. A corrente elétrica alternada de que nos servimos é oscilatória, e oscilações da corrente em circuitos elétricos têm inúmeras aplicações importantes. (Nussenzveig, 2002, p. 40). [Nus02]

A partir do exposto por H. Moysés Nussenzveig sobre o quão presente estão as oscilações em nosso cotidiano, inicialmente os vinte e nove estudantes da 1ª série (turma B) apenas 09 responderam a pergunta 01 do QPr2 (aplicado antes da realização de Exp. 02) a qual era perguntado: “Você acha que seria possível determinar a constante elástica de uma mola usando-se movimentos oscilatórios?”. Nesse contexto, o gráfico da Figura 3.17 esclarece melhor como os estudantes compreendem⁴⁸ movimentos oscilatórios.

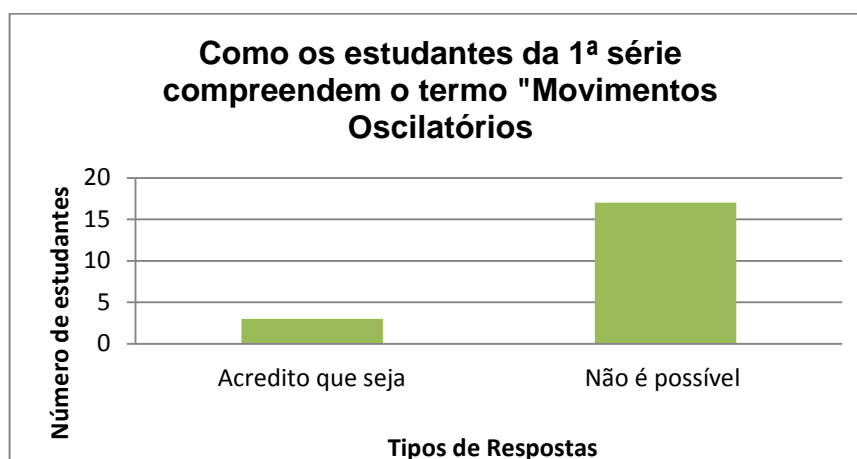


Figura 3.17 - Gráfico da quantidade de alunos versus os tipos de respostas dadas pelos estudantes. Os estudantes participantes responderam a questão 1 do QPr2: “Você acha que seria possível determinar a constante elástica de uma mola usando-se movimentos oscilatórios?”. FONTE: alunos e autor.

Após responderem o QPr2, realizou-se uma explicação do professor por meio de exposição do conteúdo na lousa. Realizada a análise das respostas ficou nítida a não compreensão de vinte e quatro estudantes somente com a utilização de uma aula expositiva; apenas cinco estudantes consideraram ser possível determinar a constante elástica k de uma mola helicoidal utilizando-se do procedimento oscilação

⁴⁸Nesse caso levou-se em consideração a compreensão individual sobre o fato dos estudantes conhecerem ou não o termo Movimentos Oscilatórios. Cabe ressaltar que tal compreensão do termo seria com base nas aplicações físicas do mesmo. Após a aplicação do QPr2, perguntou-se a turma se os mesmos conheciam tal termo e a verificação foi realizada por aclamação. Após a manifestação dos estudantes, explicou-se tal termo com a utilização da lousa e giz e da reprodução de exemplos no cotidiano conforme exposto por Nussenzveig (2002), uma vez que compreender o termo Movimento Oscilatório é um critério para a determinação da constante elástica a partir de um sistema massa-mola utilizando-se de oscilações (caso dinâmico).

(conforme apresentamos na subseção 1.4.2 e 1,10; e na seção 2.4 – Quadro 2.3). A questão 02 do QPr2 - “Como você pensa que poderia ser realizada a determinação da constante elástica k de uma mola, usando movimentos oscilatórios?”, não forneceu respostas que pudessem ser consideráveis, uma vez que os estudantes não conseguiram propor uma maneira de como poderia ser realizado esse procedimento. Uma evidência deste fato pode estar associada a não compreensão do que seria oscilação para a determinação da constante elástica, mesmo havendo uma explicação (ainda que breve) sobre tal conceito. Nesse sentido, observou-se a necessidade da aplicação do experimento não somente para a determinação da constante elástica da mola helicoidal, mas para o entendimento do movimento oscilatório acoplado a ele, que *a priori* não fora compreendido pelos estudantes participantes.

Embora a maioria não tivesse compreendido o termo “movimentos oscilatórios”, dois estudantes relataram, ainda que superficialmente, o que seria um movimento oscilatório, como mostra a resposta da questão 3: “Qual sua definição para movimento oscilatório?” Percebeu-se, que a resposta é uma reprodução mecânica sobre movimentos oscilatórios. A Figura 3.18 e Figura 3.19 retratam, respectivamente, na íntegra, as respostas dos estudantes 13 e 21.

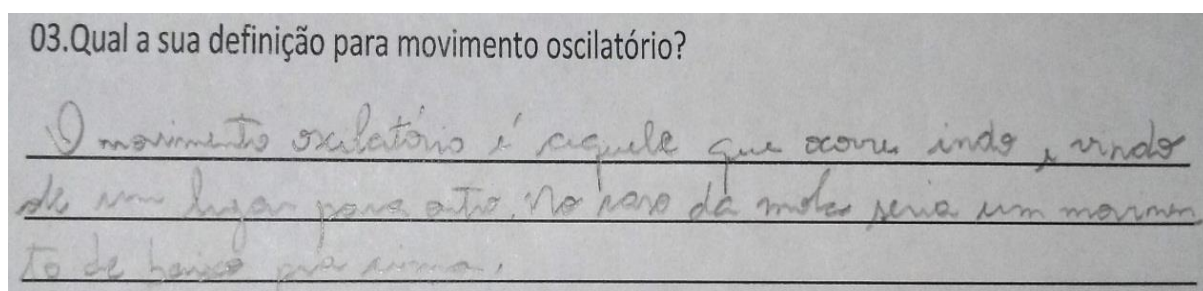


Figura 3.18 - Imagem fotográfica da resposta prévia ao Exp. 01, QPr2, do estudante 13 para a questão 03. Transcrição: “O movimento oscilatório é aquele que ocorre indo e vindo de um lugar para outro. No caso da mola seria um movimento de baixo pra [sic] cima.” FONTE: estudante 13 e arquivo do autor.

03. Qual a sua definição para movimento oscilatório?

É um movimento de subir e descer, como acontece se a gente estica uma mola e solta. Vamos observar que a mola faz um movimento de vai e volta até que para.

Figura 3.19 - Imagem fotográfica da resposta prévia ao Exp. 01, QPr2, do estudante 21 para a questão 03. Transcrição: “É um movimento de subir e descer, como acontece se a gente estica uma mola e solta. Vamos observar que a mola faz um movimento de vai e volta até que para [sic]”. FONTE: estudante 21 e arquivo do autor.

A pergunta 04 do QPr2, “De acordo com a etapa I que você realizou, é possível chegar a um mesmo valor de k usando-se de procedimentos diferentes?”, as respostas também surpreenderam, conforme apresentado no gráfico da Figura 3.20.

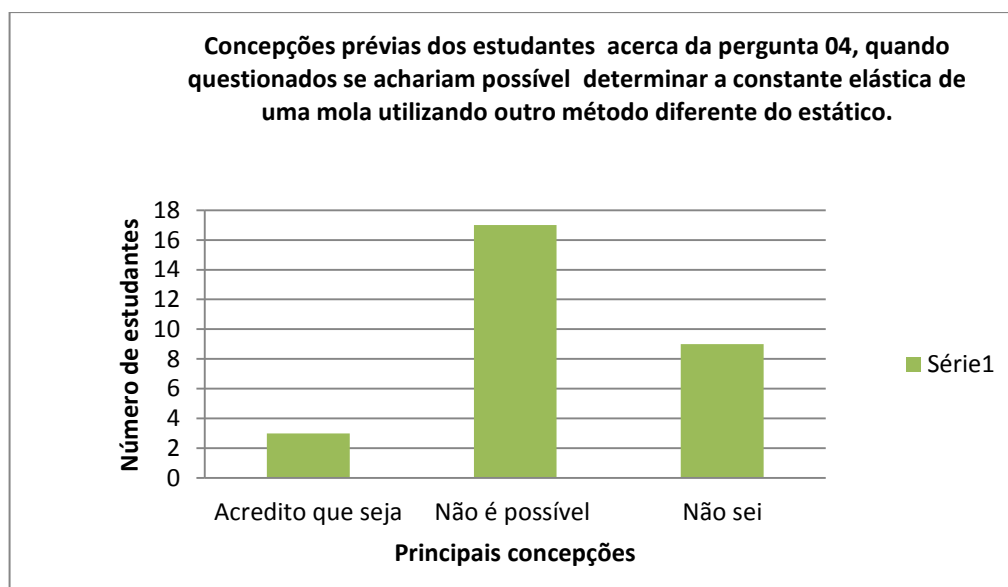


Figura 3.20 - Gráfico do Número de estudantes versus principais concepções. O gráfico apresenta as principais respostas dos estudantes com relação à questão 04, quando questionados se achariam possível determinar a constante elástica de uma mola utilizando outro método diferente do estático. FONTE: o autor.

Ao analisarmos o gráfico apresentado na Figura 3.20, observamos que 17 (dezessete) estudantes acreditam que seja possível determinar a constante elástica de uma mola helicoidal por apenas um método, neste caso, o estático, que os mesmos já haviam realizado (Exp. 01). Esse número elevado de estudantes demonstra uma pré-disposição dos estudantes em limitarem-se apenas a um

método para a obtenção de k . Além disso, podemos destacar a falta de conhecimento dos estudantes e/ou a falta de terem visto o experimento do pêndulo simples ou algo análogo, que trata de movimentos oscilatórios. Isso pode, mais uma vez, nos remeter à fragmentação do Ensino de Ciências já que as respostas relatadas pelos estudantes remetem a uma ciência pronta e acabada que não possui novas formas, modelos ou métodos para ser direcionada.

Carvalho (*et al*, 2010) aponta que uma das causas para tal fragmentação no Ensino de Ciências, de forma especial o de Física, está relacionado ao fato dos estudantes não debaterem sobre Ciência nas escolas. A autora ressalta ainda que pouco se faz relação entre o ensino de Ciências com os debates atuais. Sendo assim:

Mais que em outras áreas, no caso do ensino de Ciências de modo geral, e da Física em particular, [...], ao mesmo tempo em que os alunos convivem com acontecimentos sociais significativos estreitamente relacionados com as Ciências, e a Tecnologia e seus produtos, recebem na escola um ensino de Ciências que se mostra distante dos debates atuais. Muitas vezes, os alunos acabam por identificar uma Ciência ativa, moderna, e que está presente no mundo real, todavia, distante e sem vínculos explícitos com uma Física que só “funciona” na escola. (Carvalho *et al*, 2010, p. 29).
[Carv10]

Em relação aos possíveis erros apontados pelos estudantes ao tentar determinar a constante elástica utilizando-se do método dinâmico (movimento oscilatório), apenas o estudante 06 registrou sua resposta. Conforme nos apresenta a Figura 3.21, o estudante associou aleatoriamente (uma vez que não respondeu às questões 02 e 03) o fato de utilizar-se a variável tempo a fim de medir o período de oscilação realizado pelo sistema massa-mola.

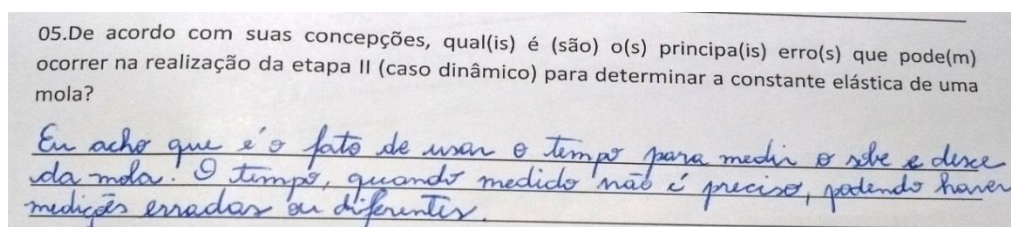


Figura 3.21 - Imagem fotográfica da resposta do estudante 06 para a pergunta 05 do QPr2. FONTE: estudante 06 e arquivo do autor.

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos na aplicação do Exp. 02 e a análise do questionário avaliativo (QPo2).

3.2.2 Experimento 02 - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal – Método Dinâmico – E, questionário avaliativo QPo2.

A aplicação do Exp. 02: **Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal – Método Dinâmico** da SD deste produto educacional teve sua importância dobrada, pois além de determinar matematicamente a constante elástica da mola por meio de um procedimento físico diferente do realizado no experimento 1, os estudantes também precisariam compreender de fato o que seria o movimento oscilatório e qual a relação deste com o caso dinâmico proposto para esta etapa. Destacamos que o experimento em questão possui mais cálculos matemáticos que o anterior, tais como, tempo médio e período de oscilação da mola.

Mantendo-se os grupos da Etapa 1 os alunos foram desenvolver, sob orientação constante, os procedimentos inerentes à Etapa 2 desta sequência didática. Foi mantida a mesma mola helicoidal do Experimento 01, uma vez que um dos objetivos da etapa era determinar a constante elástica k por meio das oscilações da mola. A Figura 3.22 apresenta o conjunto de molas identificadas para serem distribuídas aos seus respectivos grupos.



Figura 3.22 - Imagem fotográfica das molas nos suportes metálicos utilizadas pelos grupos de alunos no Exp. 01, e identificadas para uso no Exp. 02 e 03. FONTE: o autor.

Inicialmente os grupos foram orientados a realizar a montagem experimental, conforme apresentado no Quadro 2.4 (seção 2.3). A partir daí, os estudantes foram orientados a utilizar e medir a massa da mola que respondesse com o melhor movimento oscilatório (“sobe e desce” ou “desce e sobe”, dependendo de onde se inicia o movimento), para realizar dez oscilações. Orientou-se ainda ao fato da mola

não poder realizar movimentos pendulares e que estes não poderiam ser inclusos nas oscilações da mesma. Com estas orientações iniciais, os estudantes puderam remeter à pergunta 05 do QPr2, sendo a realização do movimento pendular pela mola ou qualquer perturbação que viesse a acontecer, como erros no procedimento; e isso, iria prejudicar na determinação de um valor para a constante elástica próxima ou igual a determinada na Etapa 01 (Exp. 01).

Realizadas as orientações iniciais, os grupos, tendo em mãos o roteiro da atividade prática (Exp. 02 – Quadro 2.7) a ser desenvolvida deram início aos seus respectivos trabalhos.

Para medir o tempo de oscilações da mola os estudantes utilizaram-se do cronômetro (incluso no *kit*) ou mesmo do cronômetro presente no celular. A Figura 3.23 apresenta um dos grupos realizando a medida do tempo das oscilações sofrida pela mola.



Figura 3.23 - Fotografia do grupo de estudantes realizando o Exp. 02 da SD. FONTE: o autor.

Realizadas as etapas iniciais os grupos puderam determinar a constante elástica k da mola por meio da Equação [1.20]. Além de utilizarem-se da Equação [1.19] para determinação da constante elástica da mola helicoidal em movimento oscilatório, os estudantes puderam calcular o período de oscilações completas para obter o tempo de um período, bem como, puderem ter contato prático com conceitos até então abstratos, tais como, movimento oscilatório, movimento pendular e período de oscilações.

Um dos objetivos do Exp. 02 dessa SD seria obter um valor de k , e esse valor deveria ser próximo ao calculado no Exp. 01 uma vez que a mola utilizada pelo grupo fora a mesma em ambas as etapas de realização dos procedimentos propostos. A Tabela 3.1 apresenta os resultados obtidos em Exp. 01 e Exp. 02 do

PE.

Tabela 3.1 - Dados comparativos, por grupo, a partir da determinação da constante elástica no Exp. 01 e Exp. 02. A coluna D(%) representa o desvio percentual entre os resultados obtidos no Exp. 01 e Exp. 02. Cabe considerar que o caso estático possui menos chances de erros, e, portanto, fornece valores mais próximos do real. FONTE: o autor.

Grupo	Exp. 01: k (dina/cm)	Exp. 02: k (dina/cm)	D(%)
A	6533,33	6771,20	3,6
B	6083,10	7111,13	16,9
C	6533,33	6123,44	6,3
D	6533,33	10345,22	58,3
E	21956	2913,23	8,7
F	6030,80	4556,33	24,5
G	5360,2	6223,44	16,1

Ao observarmos a Tabela 3.1 identificamos os respectivos valores de k para uma mesma mola helicoidal utilizando-se de procedimentos diferentes para obtê-la. Ressalta-se que os valores aproximados de k possuem uma diferença considerável para o grupo D (58,3%) e Grupo F (24,5%). Nos demais grupos há pouca diferença numérica no valor da constante elástica o que nos remete estar tecnicamente com os valores obtidos próximos do real.

Os discentes puderam realizar a avaliação posterior à aplicação do Exp. 02 e os resultados obtidos foram satisfatórios. O estudante 12, membro do grupo E, relatou que o valor de k obtido pelo seu grupo fora “[...] *satisfatório, mas poderia ser melhor. Acho que devido ao fato de medir o tempo médio, acabamos nos perdendo em alguns momentos o que prejudicou um valor de constante elástica mais próximo do que a gente conseguiu na primeira etapa*”.

Um erro comum, quando se trabalha com cronômetro e movimentos periódicos, em que se deve contar um processo de ida e volta se referindo a um período, é o de ao acionar o cronômetro. Pode se erroneamente contar 1 (um), quando seria o 0 (zero). Outro ponto, que influência no resultado é observar se a amplitude não diminui no tempo de períodos estipulados. No caso, estipulou-se o tempo de 10 (dez) períodos (mesmo tendo selecionado inicialmente uma mola que pudesse completar, vai depender da observação dos experimentadores), mas se a mola durante esse processo tenha tido a atuação da força de resistência do ar, e a

amplitude ter diminuído, já influencia no resultado final, visto que está se considerando a conservação de energia mecânica, portanto, um processo onde as forças dissipativas são desprezíveis.

Uma consideração a ser levantada na análise dos resultados deste experimento é a resposta dada pelos estudantes acerca do item “e” do questionário aplicado posterior a realização do Exp. 02. O item se refere a seguinte pergunta: “Quais foram as dificuldades e facilidades que você pode apontar na realização deste experimento?” e, as principais mudanças de percepções pelos estudantes no que diz respeito aos conceitos físicos presentes nesta experimentação. Nesse sentido, destacamos algumas respostas, reproduzidas de acordo com as palavras dos estudantes, referentes às facilidades e dificuldades acerca da realização do Exp. 02, conforme apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Transcrição das respostas de alguns estudantes antes (QPr2) e após (QPo2) a realização do Exp. 02. FONTE: o autor.

Aluno	Respostas prévias (QPr2) referente aos conceitos físicos: Questões de 01 a 04 – Quadro 2.3	Resposta ao item “e” (QPo2) após a realização do Exp. 02: “Quais foram as dificuldades e facilidades que você pode apontar na realização deste experimento?”
02	Absteve de responder as questões prévias, alegando somente “Não sei”.	<i>“Achei legal o experimento. Pude perceber que é possível usar mais de um método prático na física. Meu grupo conseguiu um valor para a constante elástica quase igual ao obtido no primeiro experimento”.</i>
16	Absteve de responder as questões prévias, alegando somente “Não sei”.	<i>“Agora entendi um pouco mais sobre oscilações. Essas perturbações que ocorrem nos corpos permitiram calcular o período e depois a constante elástica. Precisaríamos realizar mais uma vez para termos uma medida mais exata mas não deu tempo. Ainda</i>

		<i>assim, a k da nossa mola é quase a mesma do processo estático”.</i>
18	Absteve de responder as questões prévias, alegando somente “Não sei”.	<i>“Eu achei interessante poder calcular a constante da mola de uma outra forma. Ficou parecendo investigação de filmes com essa ‘pressão’ de chegar ao mesmo valor do anterior. Foi bem bacana. Até entendi mais algumas coisas de física”.</i>
24	Absteve de responder as questões prévias, alegando somente “Não sei”.	<i>“[...] o movimento oscilatório da mola permitiu que nós pudéssemos calcular a constante dela. Por pouco não chegamos no mesmo valor do experimento 1. Gostei da parte matemática que esteve mais presente nesse experimento do que no outro”.</i>
27	Absteve de responder as questões prévias, alegando somente “Não sei”.	<i>“Foi legal calcular a constante elástica por esse método. Mas a minha ficou muito longe do valor do experimento 1. Talvez precisava realizar de novo, pois a mesa balançou algumas vezes e fez com que a mola realizasse um movimento parecido ao de um pêndulo”.</i>

As respostas dos estudantes, registradas no Quadro 3.1, nos remete que houve aprendizagem ou então foram “criados caminhos” para que houvesse uma aprendizagem significativa. Fica claro que os alunos, ao serem motivados para a realização de uma atividade prática potencialmente significativa, podem se divertir e, além disso, aprender com propriedade, construindo conceitos até então abstratos

e superficiais no cognitivo dos mesmos.

A seguir, passamos a analisar o referente à seção 3.4: Questionário Prévio 03 (QPr03), os resultados experimentais do Exp. 03, bem como, as atividades avaliativas posteriores à realização do experimento (QP03).

3.3 Etapa 03 – Lei de Hooke – Associação de Molas - Série e Paralelo

Nesta terceira etapa observamos os alunos mais familiarizados com seus trabalhos, uma vez que passariam a realizar a terceira etapa desta SD, que consiste em associar molas em série e em paralelo, buscando calcular o valor da constante elástica da mola helicoidal.

Para esta etapa, assim como nas demais, os estudantes foram inicialmente submetidos a responder um questionário prévio, contendo questões voltadas à associação de molas helicoidais.

3.3.1 Análise das respostas do Questionário 03 (QPr3) - Concepções Prévias sobre a Lei de Hooke – Associação de molas.

Sobre as concepções prévias apontadas pelos alunos nesta etapa de realização, destaca-se o fato de vinte e três (23) estudantes responderem saber o que é uma associação de molas. Talvez movidos pela realização dos experimentos 1 e 2 desta sequência didática, as respostas prévias dos estudantes para essa etapa foram as mais consistentes, de modo que os mesmos relacionaram as atividades experimentais realizadas anteriormente e até mesmo ao cotidiano.

Um estudante (Figura 3.24) relacionou a associação de molas a um colchão para dormir. O mesmo relatou em sua resposta que as molas são dispostas lado a lado, de forma a distribuir igualmente o que o mesmo chamou de força.

Nº.: 13 Série: 1º ano CONCEPÇÕES PRÉVIAS

LEI DE HOOKE - CASO DINÂMICO

01. O que você entende por associação de molas?

É como num colchão de molas. As molas estão colocadas lado a lado de forma a receber igualmente uma força e poder suportar. Tênis também possuem molas (mais de uma) para suportar melhor os impactos.

Figura 3.24 - Imagem fotográfica da resposta indicando a Concepção prévia do estudante 13 sobre associação de molas. Transcrição: “É como num colchão de molas. As molas estão colocadas lado a lado de forma a receber igualmente uma força e poder suportar. Tênis também possuem molas (mais de uma) para suportar melhor os impactos.” FONTE: questionário respondido pelo aluno 13, e arquivo do autor.

De um modo geral, pode-se afirmar que os estudantes apresentaram boas concepções acerca da associação de molas. Voltamos a frisar que este fora o questionário com as melhores concepções prévias e isto já pode ser considerado um avanço em função dos questionários aplicados anteriormente.

Dos vinte e nove estudantes que responderam o questionário prévio, dezessete desses acreditam ser possível a realização de um experimento que utilize mais de uma mola, mas em contrapartida, relataram apenas a associação em paralelo mesmo sem usar o termo “paralelo”. O gráfico da Figura 3.25 apresenta o número de alunos e o tipo de resposta referente à questão 1 do QPr3.

De um modo geral, os estudantes, nesta etapa, já estavam mais “familiarizados” com a SD e descreveram respostas prévias mais concisas para as três primeiras questões. A única questão que não fora previamente respondida por nenhum aluno é a questão 04, a saber: “Como você relacionaria uma associação de molas (em série ou em paralelo) com o princípio de conservação de energia?”. É evidente nesse caso, que os estudantes desconhecem ou pouco domina o conceito de energia, tão importante na Física. Embora os estudantes não tivessem respondido essa questão, não relatamos nada sobre esse conceito aos estudantes.

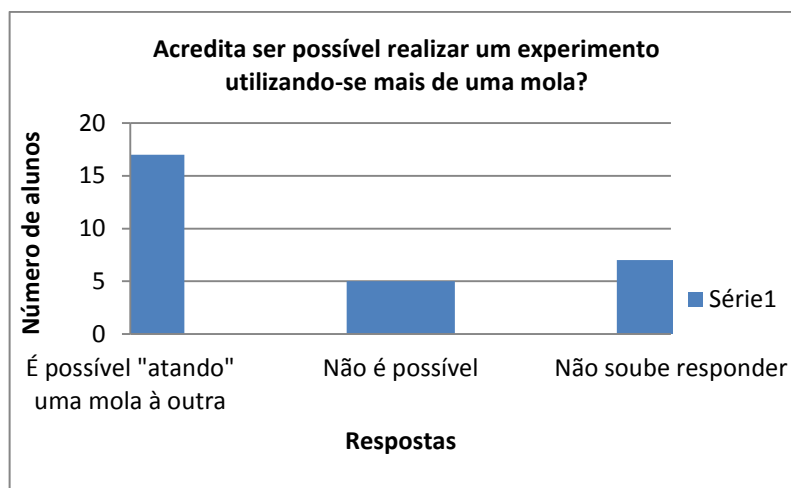


Figura 3.25 - Gráfico do número de alunos versus o tipo de respostas sobre as concepções prévias dos estudantes sobre a possibilidade de usar mais de uma mola para um procedimento experimental. FONTE: o autor.

Trabalhar a conservação de energia é um dos objetivos dessa dissertação de mestrado, nessa perspectiva, levamos em consideração o exposto por Moreira (2011), baseando-se na teoria de aprendizagem de Ausubel, onde o autor distingue a aprendizagem significativa e aprendizagem mecânica (ou por recepção). Nesse sentido:

Segundo Ausubel, na aprendizagem por recepção o que deve ser aprendido é apresentado ao aprendiz em sua forma final, enquanto que, na aprendizagem por descoberta, o conteúdo principal a ser aprendido deve ser descoberto pelo aprendiz. (Moreira, 2011, p. 162). [Mor11]

Diante do exposto, acreditamos ficar mais viável fazer com que os alunos fossem em busca do conceito energia e conseqüentemente a forma com a qual esta é conservada. Demos ênfase a este conceito tão importante para a Física no Exp. 04 (seção 2.4 – Quadro 2.9) desta SD.

3.3.2 Determinação da constante elástica de uma mola utilizando a associação de molas em série e em paralelo e QPo3: análise e discussão dos resultados.

O Exp. 03 é o que consideramos ser o mais complicado dentre os experimentos apresentados na SD, uma vez que levam em consideração valores comparativos obtidos na realização de Exp. 01 e Exp. 02 e, das associações das molas em série e em paralelo. Optou-se por fazer somente a parte dinâmica, por

questões de tempo e por ser a parte que mais gerou curiosidade por parte dos alunos. A determinação do período de oscilação das molas remete certo cuidado, uma vez que é tendenciosa ao erro, devido ao fato de utilizar-se de medidas de tempo (que pode variar) além das oscilações que podem ocorrer de formas diferentes (não se mantendo somente na vertical, mas com movimentos aleatórios em relação ao mesmo).

Como já iriam utilizar os valores da constante elástica, k , medida em dina/cm, obtidos na realização de Exp. 01 e Exp. 02, coube aos grupos à tarefa de aprofundar um pouco mais a investigação acerca do período de oscilação para uma única mola; para duas molas associadas em série e para duas molas associadas em paralelo.

Embora necessite da utilização de equações matemáticas mais elaboradas, conforme apresentada na fundamentação teórica (seção 1.4) dessa dissertação, houve cuidado em relação ao conceito físico que deveria prevalecer, uma vez que este é fundamental. O objetivo do experimento, além do cálculo da constante elástica, era ainda demonstrar o que acontece com o valor de k quando associamos molas em série ou em paralelo. Utilizando-se a equação matemática que rege a associação em série (Equação [1.5]) e em paralelo (Equação [1.8]).

Pode-se perceber que os alunos haviam compreendido o conceito físico presente na Equação⁴⁹ [1.4], considerando-se que nesse caso, prevalece o fato da série de molas “dividir” o valor da constante elástica obtida por dois (pois $k_1 = k_2$). Outra importante evidência é que a matemática aplicada nesta etapa passou a ter significado físico, ou seja, os estudantes não calcularam por calcular a constante elástica da série, mas percebeu-se a significação física construída pelos discentes no momento da realização dos cálculos matemáticos que era intuitivamente o que já haviam compreendido observando a montagem experimental. Houve ainda atenção para a associação em paralelo de molas e a demonstração matemática da mesma por meio da Equação [1.8].

Por meio da Equação [1.8] os estudantes puderam comprovar que quando duas molas são associadas em paralelo, ambas sofrem a mesma deformação Δx e a constante elástica da associação é a soma das constantes elásticas parciais.

Como mencionado, os estudantes já conheciam as constantes elásticas de suas respectivas molas, pois foram as utilizadas nas etapas anteriores. Era

⁴⁹ $k_1 = k_2 = k \rightarrow k_s = \frac{k}{2}$.

necessário ainda realizar a determinação dos períodos relacionados a uma única mola e as suas respectivas associações. Nesse sentido buscou-se a construção de tabelas e gráficos para posteriores leituras e interpretações. Cabe ressaltar que os grupos confeccionaram seus gráficos mantendo o uso do Microsoft Excel 2010® até agora utilizado, pois este, como já citado, é um programa de fácil acesso aos estudantes.

As principais considerações a serem levantadas nesta etapa da SD é a de que os estudantes puderam ter contato com a associação de molas (série e paralelo) e determinar suas respectivas constantes elásticas. Cabe ressaltar que alguns estudantes puderam verificar na prática mais uma vez as oscilações e entender como são determinados os períodos dessas oscilações para essas configurações. Cabe frisar que as concepções relatadas anteriormente foram observadas após a aplicação do questionário prévio, bem como, da realização do Experimento 3. A seguir, passemos a analisar, mais detalhadamente, o que aconteceu durante esta etapa.

A Figura 3.26 apresenta duas respostas, dos estudantes 15 e 23, respectivamente, acerca da realização e concepções adquiridas a partir da realização desta prática, ao responderem à questão “g” do QPo3: **“Relate as principais dificuldades encontradas na realização do experimento. Relate também as suas considerações favoráveis em relação ao experimento”**

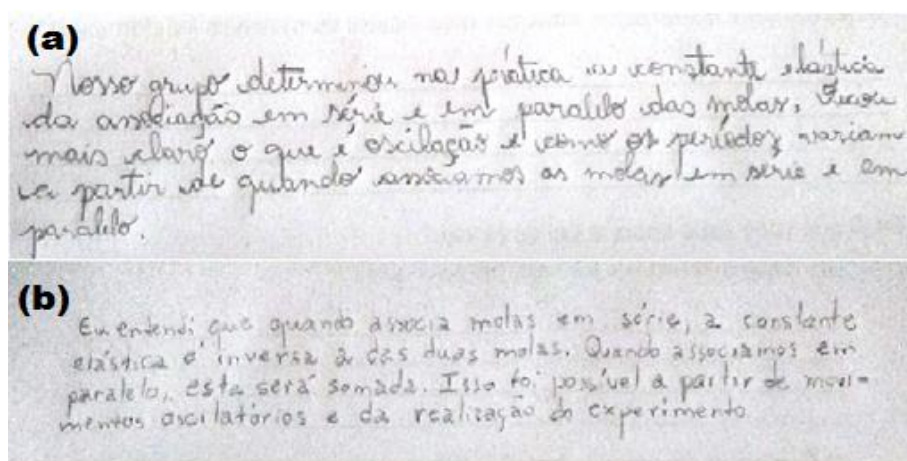


Figura 3.26 - Imagem fotográfica de respostas da questão Relate as principais dificuldades encontradas na realização do experimento. Relate também as suas considerações favoráveis em relação ao experimento (Item “g” do QPo3) dos estudantes 15 e 23, respectivamente, após a realização do Exp. 03. Transcrição das respostas: (a) Aluno 15 - “Nosso grupo determinou na prática a constante elástica da associação em série e em paralelo das molas. Ficou mais claro o que é oscilação e como os períodos variam a partir de quando associamos as molas em série e em

paralelo”. (b) Aluno 23 - “Eu entendi que quando associa molas em série a constante elástica é inversa a das duas molas. Quando associamos em paralelo esta será somada. Isso foi possível a partir de movimentos oscilatórios e da realização do experimento”. FONTE: questionário respondido pelos alunos 15 e 23 e arquivo do autor.

Nota-se nessas respostas que os estudantes assimilaram e conseguiram apontar diferenças acerca dos processos de associação. Além disso, pode-se perceber que nestas respostas os estudantes atêm-se somente a esses processos (associação em série e em paralelo), e ao processo de oscilações.

A Figura 3.27 apresenta um registro mais elaborado, com o estudante 12, para a mesma pergunta “g” do QPo3, em que o mesmo relaciona as molas helicoidais com o termo “energia”. Embora apresente certo equívoco físico em sua resposta, podemos observar que o mesmo (sendo o único aluno até então), utiliza-se do conceito de energia para tentar explicar que a constante elástica equivalente k_{eq} se divide quando temos $k_1 = k_2$, uma vez que esta relação está diretamente associada à energia potencial elástica.

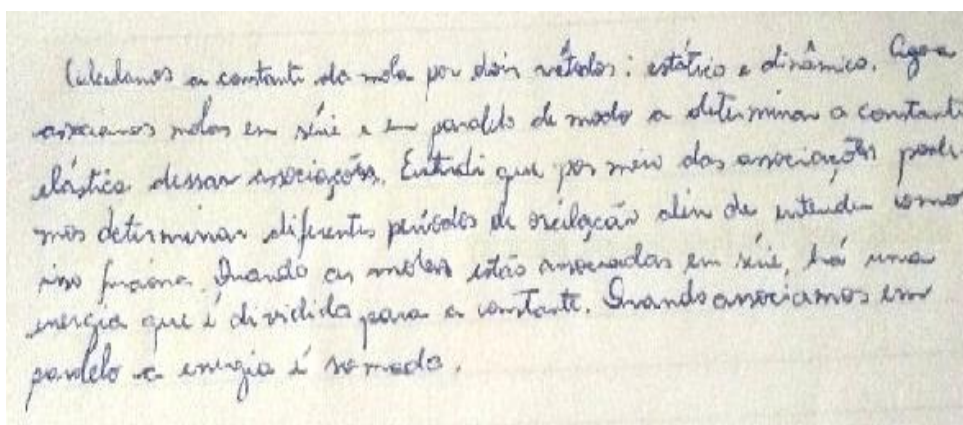


Figura 3.27 - Foto do registro da resposta do aluno 12 após a realização do Exp. 03. Transcrição da resposta: “Calculamos a constante da mola por dois métodos: estático e dinâmico. Agora associamos molas em série e em paralelo de modo a determinar a constante elástica dessas associações. Entendi que por meio das associações podemos determinar diferentes períodos de oscilação além de entender como isso funciona. Quando as molas estão associadas em série, há uma energia que é dividida para a constante. Quando associamos em paralelo a energia é somada. FONTE: questionário do estudante 12 e arquivo do autor.

Analisando os recursos inerentes a esta etapa da SD destacamos a interdisciplinaridade entre a Física e a Matemática, uma vez que os estudantes observaram não somente conceitos físicos, mas buscaram elementos da matemática para explicar o ocorrência de conceitos relacionados as associações em série e em paralelo.

Um fato importante, é que independente do processo, dinâmico ou estático, o resultado da constante elástica deve ser o mesmo. Acrescentar um movimento oscilatório foi importante para enriquecer o assunto e poder explorar teoricamente e experimentalmente o conceito de armazenamento de energia potencial (elástica e gravitacional) em uma mola na vertical e que se transforma em energia cinética, e vice versa. E, que no tempo de medida, em que as forças dissipativas possam ser consideradas desprezíveis durante o período oscilatório, a energia mecânica se conserva.

E, por último na etapa 04, apresenta-se outra aplicação de armazenamento de energia potencial elástica se transformando energia cinética (movimento).

3.4 Etapa 04 - Conservação de Energia Mecânica - O curioso caso da “lata energética”.

O quarto e último experimento da SD, assim como os demais, transcorreu com a aplicação inicial de um questionário prévio, conforme o disponível nesta dissertação (seção 2.3 - Quadro 2.5); realização do Exp. 04 (Quadro 2.9) e, por fim, aplicação do questionário avaliativo (QPo4) - Quadro 2.13. As análises dos resultados dessas etapas estão apresentadas nas subseções a seguir.

3.4.1 Análise das concepções prévias (QPr4)

Percebeu-se, nesta etapa da SD, que os discentes já estavam mais envolvidos com o desenvolvimento das atividades propostas, demonstrando mais desenvoltura na realização da mesma.

O questionário aplicado nesta etapa tinha por objetivo identificar os conhecimentos prévios dos alunos acerca de conceitos físicos, tais como: energia; conservação de energia, principalmente em molas ou materiais deformáveis; transformação de energia e energia potencial elástica. Em relação às concepções prévias, os estudantes demonstraram respostas voltadas aos experimentos realizados nas etapas anteriores, levando-se em consideração o sistema massa-mola. Na questão 01, os alunos registraram que é possível construir um sistema de

armazenamento de energia potencial. Porém, dos vinte e nove alunos, apenas sete relacionaram esse sistema de armazenamento ao conjunto massa-mola.

Devido ao fato do Experimento 04 não utilizar um sistema massa-mola como nos experimentos anteriores dessa SD, e sim um elástico de tira (tipo elástico chato), houve a necessidade de compreender se os estudantes saberiam mencionar as diferenças e semelhanças desses dois materiais distintos. A pergunta “Qual a relação entre uma mola helicoidal com um elástico?”, fora respondida por vinte e dois alunos. Destacamos aqui, duas concepções prévias, dos estudantes 12 e 08. Esses dois estudantes apontaram semelhanças entre esses dois materiais deformáveis, tais como, a elasticidade de ambos e a possibilidade do elástico possuir um valor de constante elástica como o calculado nas molas helicoidais. Apresentamos a Figura 3.28 que retrata, na íntegra, a resposta sugerida pelos estudantes.

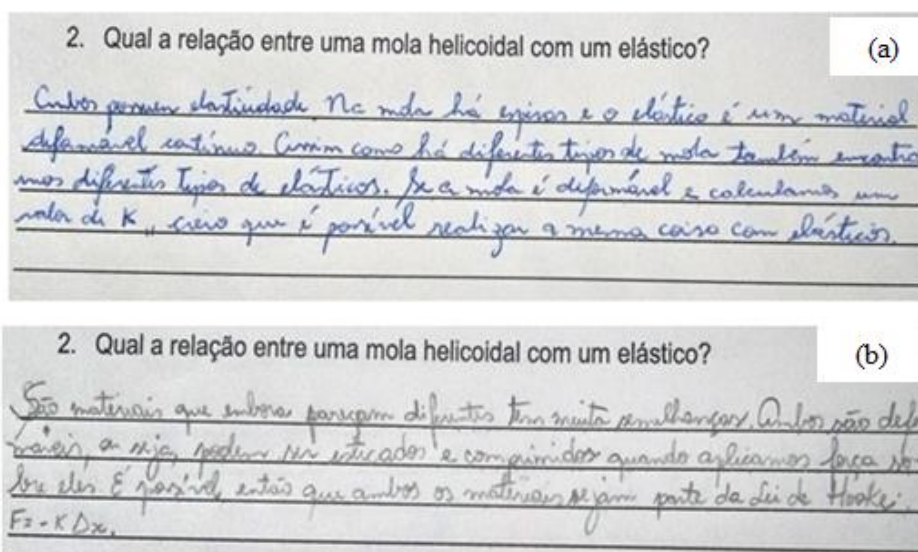


Figura 3.2 - Imagem fotográfica das respostas dos estudantes 12 e 08 acerca da pergunta 2 do QPr4: “Qual a relação entre uma mola helicoidal com um elástico?”. Transcrição das respostas: (a) Aluno 12 - “Ambos possuem elasticidade. Na mola há espiras e o elástico é um material deformável contínuo. Assim como há diferentes tipos de mola também encontramos diferentes tipos de elásticos. Se a mola é deformável e calculamos um valor de k , creio que é possível realizar a mesma coisa com elásticos”. (b) Aluno 08 - “São materiais que embora pareçam diferentes tem muita semelhança. Ambos são deformáveis, ou seja, podem ser esticados e comprimidos quando aplicamos força sobre eles. É possível que ambos os materiais sejam parte da Lei de Hooke: $F = K\Delta x$ ”. FONTE: questionário dos estudantes 12 e 08 e arquivo do autor.

A questão 03: “Como a energia mecânica pode estar associada em um sistema massa-mola?” recebeu poucas respostas. Vinte alunos responderam com “Não sei” a esse questionamento. Os demais alunos que responderam ainda

demonstraram uma resposta superficial e pouco entendível a essa pergunta prévia. Mais uma vez é perceptível o quão abstrato e ao mesmo tempo pouco entendível é o conceito de conservação de energia. As respostas carentes de informações, fornecidas pelos alunos, apontam que os mesmos possuem uma lacuna no conteúdo estruturante Energia; pois, acordo com o Caderno de Expectativas e Aprendizagens para a componente curricular Ciências em consonância com a Secretaria de Estado da Educação do Paraná (SEED/PR), propõe-se o desenvolvimento desse conteúdo nos quatro anos finais do ensino fundamental. [ParCiê08]

Os tipos de energia (eólica, mecânica, elétrica, química, solar, dentre outras) foram citados pelos estudantes na questão 04 que interrogava acerca dos conhecimentos prévios dos estudantes sobre transformação de energia. Percebeu-se, portanto, que de forma geral a turma entende e diferencia os tipos de energia, porém, não compreendem como esta pode ser armazenada e transformada.

Nenhum aluno propôs inicialmente como a energia poderia ser transformada, apenas citaram exemplos, tais como: transformação de energia mecânica em elétrica (uso de hidrelétricas); transformação de energia eólica em energia elétrica (por meio da utilização de usinas eólicas) e transformação de energia solar em elétrica. Ressalta-se que os tipos de energia são desenvolvidos em Ciências e em Geografia, abordadas com vertentes diferentes no Ensino Fundamental e posteriormente no Ensino Médio, conforme relatou a professora da componente curricular de Geografia do CEAT.

Sobre energia potencial elástica, presente na questão 05 observou-se que os estudantes já relacionam esse tipo de energia a uma mola ou um elástico. *“É a energia presente em uma mola ou em um elástico (que são materiais que se deformam)”*, relatou o aluno nº 10. Ressalva-se o fato dos estudantes em definir o conceito energia e conservação de energia, porém, tal definição parece não estar bem clara para os estudantes ainda (pelo menos até essa parte da SD).

3.4.2 Análise do resultado do Experimento 04 - Conservação de Energia Mecânica– O curioso caso da “lata energética” e do QPo4

O último experimento desta SD, Exp. 04, é uma adaptação do experimento “Lata Energética” presente no livro didático público Ser Protagonista – Física; vol. 1 das Edições SM, tendo como Editora Responsável Ana Paula S. Nani. O manual, disposto na página 190 da 3ª edição, é a proposta como atividade laboratorial para o “fechamento” do Capítulo 8 que tem como tema principal “Energia e Trabalho”. Propuseram-se, neste trabalho, modificações na parte dos procedimentos, com a inclusão de um questionário prévio e na forma de aplicação. Assim, nesta SD a aplicação do experimento ocorreu de forma análoga, ou seja, antes do desenvolvimento da teoria, motivando os estudantes a construir seus próprios conceitos e cabendo ao professor o papel de mediador do mesmo.

A primeira parte desta atividade experimental consistiu na confecção da “lata energética”. Os estudantes, mantendo-se em grupos, montaram seu sistema de armazenamento de energia utilizando-se de potes ou latas. As latas e potes utilizados, bem como a tira de elástico e o parafuso com porca não estavam presentes no *kit* inicial (a cedida pelo governo) e ficou a cargo de cada grupo qual tipo de lata (ou pote de plástico) iria utilizar na construção de seu respectivo sistema, e providenciar os mesmos para a aula experimental. A Figura 3.29 nos apresenta uma visão geral do laboratório no momento em que os estudantes realizam a confecção de suas “latas energéticas”.



Figura 3.29 - Imagem fotográfica dos estudantes organizados em grupos para desenvolvimento do Exp. 04: Construção da "lata energética". FONTE: o autor.

A Figura 3.30 apresenta os sistemas sendo construído pelos grupos, utilizando-se latas ou potes de plásticos, o elástico e o parafuso para observação prática da ação do armazenamento de energia elástica presente em um material deformável. O sistema confeccionado demonstraria ainda a transformação de

energia cinética em energia potencial elástica e vice-versa. A Figura 3.30 (a), em destaque, apresenta um dos sistemas depois de pronto, no qual é possível visualizar seus componentes principais (vantagem de realizar a montagem com um recipiente transparente).

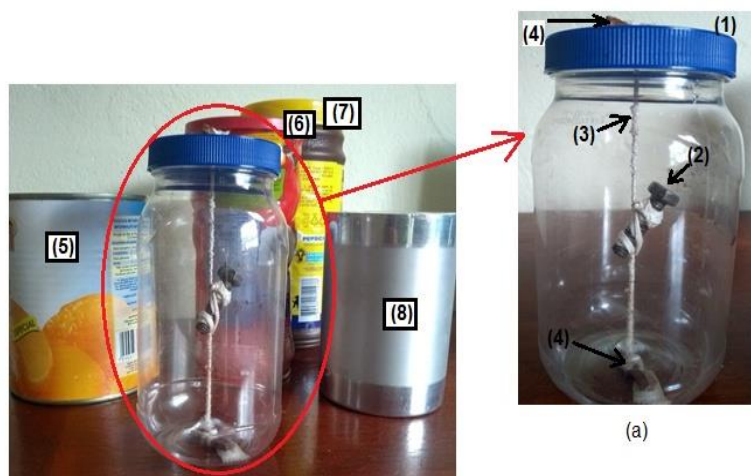


Figura 3.30 - Imagem fotográfica das montagens experimentais do sistema de armazenamento de energia de um dos grupos. Em (a) podemos observar no frasco transparente, os elementos do qual esses sistemas são constituídos: (1) pote de maionese de plástico com tampa, (2) parafuso, (3) elástico e (4) palitos de madeira, usados para fixar o elástico na extremidade da tampa e outro no fundo do frasco. Os demais frascos não transparentes, todos com tampas são: (5) lata, (6) lata de achocolatado, (7) pote de plástico de achocolatado, (8) recipiente de alumínio. FONTE: grupos A, B, C, D e E, e arquivo do autor.

Após a montagem de seus sistemas, os grupos precisavam verificar se os mesmos funcionavam. Neste momento a euforia esteve presente na turma. Inicialmente algumas “latas energéticas” não rolaram (num movimento de vai e vem, conforme se esperava). A mediação do professor nesse caso foi importante já que os sistemas estavam com falhas na torção do elástico e precisavam ser consertados. Explicou-se então, que a tira elástica no interior do sistema precisaria estar bem torcida, bem como, presa nas extremidades pelos palitos de madeira (itens (4) da Figura 3.30(a)). Outra dificuldade encontrada pelos grupos na execução do Exp. 04, fora em relação à resistência da tira elástica quando torcida, uma vez que alguns vieram a romper.

Após as demonstrações de que os sistemas funcionavam, os alunos precisariam relacioná-lo com os conceitos de conservação de energia e suas transformações. O papel de mediador coube mais uma vez ao professor que levantou alguns questionamentos a partir da execução do experimento. Percebeu-se

que os estudantes identificaram atribuições ao sistema simples que haviam construído e relacionaram-nas à conservação de energia do mesmo.

O questionário avaliativo aplicado de forma individual (QPo4), conforme apresentado nesta dissertação de mestrado (seção 2.6 – Quadro 2.13) fora respondido de forma satisfatória pelos estudantes, em que os mesmos demonstraram entendimento acerca dos conceitos de conservação e conseqüentemente da transformação de energia potencial elástica em cinética, portanto, do armazenamento de energia potencial elástica. A análise do questionário levou em consideração a aprendizagem significativa de D. Ausubel.

Sobre a função da lata, do elástico e do parafuso, referente à questão 01, vinte e dois estudantes responderam corretamente sobre as respectivas funções. Cabe ressaltar que o elástico e o parafuso desempenham papel de um “motor” que tem por função fazer com que o recipiente (lata ou o pote de plástico) adquira movimento. Essa concepção ficou clara para estes vinte e dois alunos, que relataram com o uso de palavras diferentes, mas que objetivavam a mesma definição. O Quadro 3.2 apresenta algumas concepções dos estudantes acerca do funcionamento dinâmico do sistema.

Quadro 3.2 - Transcrição das respostas de alguns estudantes sobre a função dos materiais presentes no sistema confeccionado "lata energética". Fonte: o autor.

Aluno	Resposta do aluno a Pergunta 01: “Qual a função da lata, do elástico e do parafuso com a porca?”.
07	<i>“Identifiquei que o elástico e o parafuso têm a função de dar impulso a lata para que essa entre em movimento”.</i>
12	<i>“O elástico funciona como um motor que transfere energia junto ao parafuso para que a lata entre em movimento.”</i>
15	<i>“O elástico e o parafuso fornecem energia que é transferida para a lata através do sistema montado. Quanto mais giramos o elástico e o parafuso maior será o vai e volta que a lata faz”.</i>
20	<i>“A tira elástica e o parafuso são quem fornecem energia para que o sistema role”.</i>
21	<i>“Entendi que o elástico e o parafuso com porca dão o impulso para a lata energética de modo que ela entre em movimento”.</i>
23	<i>“A lata para girar precisa que o elástico e o parafuso transfiram energia</i>

	<i>para ela. Eles funcionam neste caso como um motor.”</i>
26	<i>“O elástico e o parafuso com porca funcionam como algo que vai dar movimento para a lata. Eles são importantes para que a lata tenha movimento e vai e volta”.</i>

Percebe-se que os alunos participantes deste trabalho conseguiram, além de se divertir, entender conceitos físicos complexos de maneira prazerosa e com significação prática.

Com relação às respostas dadas pelos alunos sobre a pergunta 02: “Que tipos de transformação de energia estão envolvidos no comportamento da lata nas duas situações (quando rodada na superfície horizontal e quando colocada na rampa)?” pudemos observar que os discentes mencionaram energia potencial elástica, energia cinética e energia potencial gravitacional. Sendo este último tipo de energia associado à colocação do sistema de conservação de energia (desprezando as forças não conservativas, tais como, a força existente entre a lata e a rampa; caso contrário a energia mecânica não se conserva) sobre uma rampa.

Para melhor visualização das respostas obtidas, apresentamos o gráfico da Figura 3.31 que dispõe da quantidade de vezes que os três tipos de energia (potencial elástica, cinética e potencial gravitacional) foram mencionadas pelos estudantes durante a resolução do QPo4.

Embora não tenha havido explicação de como estariam presentes no sistema os tipos de energia, apresentados no gráfico da Figura 3.31, pode-se considerar a menção desses como um avanço, uma vez que até então não haviam sido compreendidas pelos estudantes.

Pode-se ainda perceber nos questionamentos verbais realizados durante a execução do experimento que a maioria dos discentes relacionaram os tipos de energia mencionados e listados no gráfico da Figura 3.31 com o sistema montado. Nesse sentido, os alunos apresentaram verbalmente a presença dos tipos de energia em cada parte da “lata energética”.

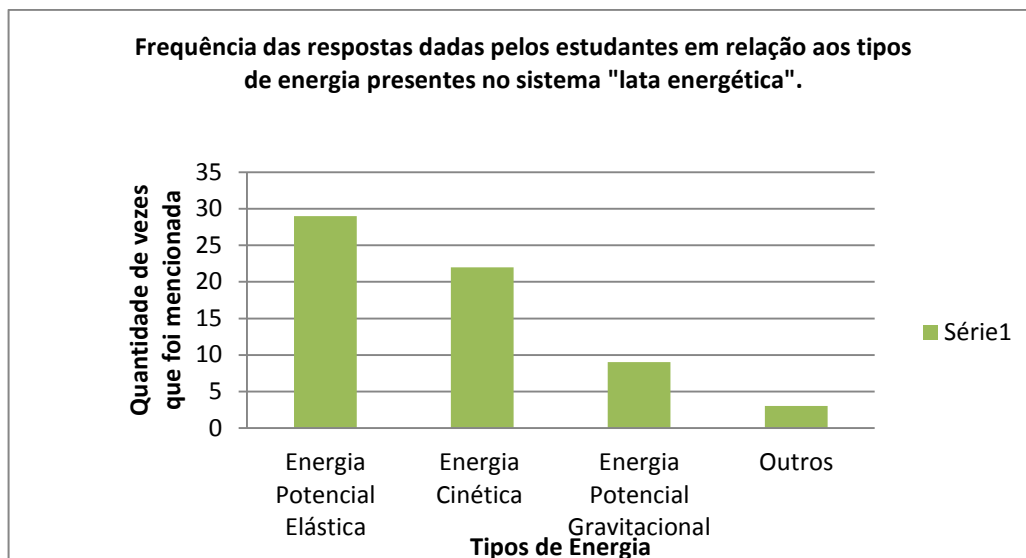


Figura 3.31 - Gráfico apresentando a quantidade de vezes que foi mencionada os tipos de energia pelos estudantes, presentes no sistema "lata energética" nas duas situações de movimento: na horizontal e em um plano inclinado, ao responderem ao QPo4. Ressalta-se que os alunos mencionaram mais de um tipo de energia. FONTE: questionários dos estudantes e arquivo do autor.

Perguntados se fariam modificações no sistema e quais seriam estas, os estudantes propuseram a substituição do elástico por uma mola helicoidal. E, para isso os palitos de fósforo deveriam ser substituídos pelos pregos por serem mais resistentes. Devido a essa sugestão, remontamos, a fim de demonstração, a "lata energética" de um dos grupos trocando o elástico pela mola helicoidal como pode ser observado na Figura 3.32:



Figura 3.32 - Imagem fotográfica da "Lata energética" montada com a substituição do elástico pela mola helicoidal, e os palitos de fósforo pelos pregos. FONTE: estudantes e arquivo do autor.

Quando posto em movimento, o sistema apresentou o mesmo comportamento quando tinha em seu interior a tira de elástico, ou seja, a mola quando torcida ao girarmos os pregos de suas extremidades, transfere energia para que o sistema realize um movimento de “vai e vem”.

Nesse sentido, os estudantes relacionaram entre o sistema construído com objetos do cotidiano, tais como relógios e brinquedos de corda. A estudante 24 afirmou que o funcionamento do sistema assemelha-se a uma caixinha de música, conforme exposto na Figura 3.33.

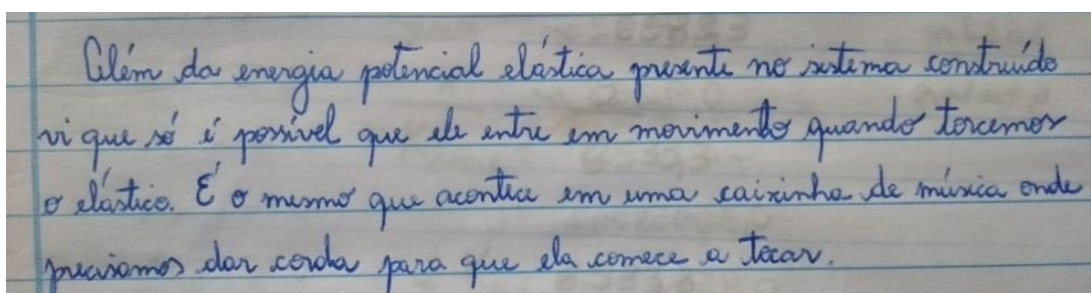


Figura 3.33 - Registro na íntegra da estudante 24, sobre a relação do experimento com um objeto do cotidiano. FONTE: aluna 24 e arquivo do autor.

As respostas registradas pelos estudantes, bem como, a predisposição desses para a realização dos experimentos propostos, mostraram notoriamente que o cognitivo dos discentes foi atingido, uma vez que os novos conhecimentos adquiridos puderam ser relacionados com o cotidiano, e este fato foi feito por meio da ancoragem entre os conhecimentos prévios e a obtenção de novas informações, conforme propõe D. Ausubel em sua teoria de aprendizagem. Em outras palavras, verificou-se a presença dos chamados subsunçores, propostos por Ausubel, como “pontes” para novas aprendizagens, presentes na realização do Exp. 04.

Ressaltamos assim, que esta atividade laboratorial foi muito divertida e o principal: observou-se ter sido bem aproveitada pelos estudantes. Destacamos, ainda, que obtivemos resultados positivos com a realização desta prática que visou a ressignificação de conceitos, uma vez que a mesma proporcionou momentos de diálogo e reflexões acerca de termos até então pouco assimilados pelos estudantes. Além disso, os estudos em grupos e compartilhamento de conhecimentos diversos entre professor e alunos fizeram desta aula (bem como de toda a SD) um material potencialmente significativo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho utilizou-se de uma sequência didática de ensino e aprendizagem sobre a lei de Hooke e conservação de energia levando-se em consideração a perspectiva da aprendizagem significativa proposta por David Paul Ausubel (1918-2008).

Objetivando sempre o saber físico dos fenômenos ocorridos durante a aplicação da sequência didática, o que se pôde observar é que os estudantes se empolgaram com as atividades do tipo investigativas inerentes do Produto Educacional presente nesta dissertação. A experimentação desses conteúdos, realizada durante a SD mostrou-se eficiente, uma vez que, motivou os discentes a aproximarem-se mais de conteúdos até então pouco conhecidos ou pouco relevantes para os mesmos.

A interdisciplinaridade ocorrida com a Matemática por meio da resolução de cálculos inerentes das equações físicas foi importante, uma vez que oportunizou o trabalho voltado ao raciocínio físico do mundo, sem deixar de lado a Matemática enquanto componente curricular. Ressalta-se que este trabalho não é voltado para a Matemática e sim para o ensino de Física, portanto, justifica-se a escolha da aprendizagem significativa para a análise dos resultados obtidos. Percebeu-se que os estudantes, de acordo com a teoria de aprendizagem mencionada, souberam explicar fenômenos físicos ocorridos durante o desenvolvimento da SD.

Os estudantes apresentaram dificuldades e/ou defasagens acerca da aplicação matemática mais simples, tal como, a leitura e interpretação de gráficos e tabelas. Sendo que esses recursos não são exclusivos dessa componente curricular, mas de todas presentes no currículo da Educação Básica, inclusive na Física. Como já exposto nesta dissertação, essa dificuldade com a linguagem matemática é resultado de um ensino fragmentado e pouco interdisciplinar.

Outro ponto a ser levantado é o da utilização do Microsoft Excel 2010®, utilizado para confeccionar os gráficos. Percebeu-se que programa é conhecido pelos estudantes, mas suas funções são desconhecidas, principalmente a de confeccionar gráficos e realizar o ajuste da reta do mesmo.

Além disso, frisamos que ao elaborar o presente produto educacional e propor a forma de análise, vimos a importância de ter um gráfico com a reta ajustada, pois este fornece um resultado melhor do que o obtido por meio da média auxiliada pelas equações. Justificando assim o uso de gráficos e ensinar ajustá-los, do que somente adotar uma reta média dos pontos que equivale a média de dados experimentais, além de trabalhar a interdisciplinaridade. Inclusive na proposta há outros gráficos que podem ser trabalhados, para explorar a comparação de resultados obtidos por meio de gráficos e pela média dos resultados. Além de poder comparar os resultados entre os próprios gráficos.

Nessa perspectiva, os alunos puderam ter contato com uma Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) ao mesmo tempo em que desenvolviam uma experimentação da área da Física, buscando determinar a constante elástica de uma ou duas molas helicoidais, em configurações diferentes.

A psicologia educacional de Ausubel comprovou-se em alguns momentos, tais como:

- A utilização de materiais potencialmente significativos que possibilitaram aos estudantes relacioná-los com o cotidiano em que estão inseridos;
- Maior aproximação do professor, como mediador do conhecimento acumulado, com os educandos visando à pesquisa investigativa acerca da aplicação da Lei de Hooke e da transformação e conservação de energia;
- A possibilidade de uma aprendizagem significativa e crítica, ratificada por meio de comparação dos questionários prévios e pós-realização de experimento em cada uma das etapas experimentais.

A psicologia educacional utilizada é complexa, uma vez que dificulta a obtenção de resultados quantitativos. Prevaleceu, portanto, a análise qualitativa pautada dentre outras coisas, a predisposição dos educandos em (re) significar conceitos previamente estabelecidos, a relação harmoniosa e afetiva professor-aluno e a utilização de material potencialmente significativo.

Além de contribuir para o benefício da aprendizagem significativa dos discentes a partir da aplicação desta SD, pudemos confeccionar um material potencialmente significativo para a aplicação desta sequência didática utilizando o *kit* disponibilizado pelo MEC que até então não possuía nenhum roteiro para sua inclusão nas aulas de Física. Com isso os alunos puderam (e outras turmas

poderão), bem como, os professores da componente curricular Física, fazer uso do material disponível de forma significativa e crítica visando à aprendizagem pautada nas mudanças de paradigmas.

Salientamos que, a possibilidade de adaptações que poderão ser realizadas pelo professor de modo a aplicar a SD de acordo com a sua realidade, uma vez que a maioria das matrizes curriculares para o Ensino Médio possui para a 1ª série uma média de duas aulas semanais de Física. Algumas matrizes apresentam apenas uma aula semanal de cinquenta minutos. Realizamos este trabalho em uma escola que possui Ensino Médio Organizado por Blocos de Disciplinas Semestrais o que nos possibilitou desenvolver a SD tendo quatro aulas semanais de Física. Portanto, voltamos a frisar que as adaptações inerentes ao PE desta dissertação caberão ao professor de Física que deverá levar em conta a realidade dos estudantes e do tempo disponível para tal.

Finalizamos o presente trabalho que tratou das temáticas “Lei de Hooke e Conservação de Energia”, sendo esses conteúdos relevantes para o ensino de Física, desenvolvidas por meio de uma sequência didática contendo cinco experimentos, distribuídos em quatro etapas visando um uso alternativo para um *kit* de materiais disponibilizado ao CEAT para uso no laboratório de Física. E, ressaltamos ainda que os experimentos podem ser aplicados separadamente, dependendo do foco a ser explorado.

E, ainda a tempo, o autor deste trabalho, entre outras atividades, desenvolveu um trabalho com os alunos, direcionado com o estudo de lançamento oblíquo, por meio de lançamento de foguetes. Essa experiência lhe rendeu um artigo [NitsZanCar19], aceito para publicação, em uma das atividades da disciplina de Marcos do Desenvolvimento em Física/MNPEF cursado em 01/2018. Essa atividade e artigo vêm ao encontro com o presente trabalho que consiste em utilizar experimentos com os alunos para o Ensino da Física.

Referências

- [Bar12] BARROS-MENDES, Adelma. CUNHA, Débora A. TELES, Rosinalda. (2012) *Organização do trabalho pedagógico por meio de sequências didáticas*. Pacto Nacional pela Alfabetização na Idade Certa. Ano 03. Unidade 06. Brasília: Ministério da Educação –MEC, SEB.
- [Bras01] BRASIL. Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica (2001). *Parâmetros Curriculares Nacionais Mais: Ensino Médio* – Brasília: Ministério da Educação.
- [Bri08] BRITO, Armando A. de Sousa. (2008) *Quem tramou Robert Hooke?*. *C. Tecn. Mat.*, 20, 35-50. Retrieved from <http://www.scielo.mec.pt/pdf/ctm/v20n3-4/v20n3-4a07.pdf>.
- [Carv10] CARVALHO. Anna Maria Pessoa de. [et al.] (2010). *Ensino de Física*. - São Paulo: Cengage Learning, - (Coleção ideias em ação / Anna Maria Pessoa de Carvalho).
- [Evan11] EVANGELISTA, Luiz Roberto. (2011). *Perspectivas em História da Física – Vol. I – Dos Babilônicos à Síntese Newtoniana*. Rio de Janeiro. Ed. Ciência Moderna Ltda,
- [Feyn08] FEYNMAN, Richard.(2008). *Lições de física de Feynman*. Trad. Adriana Válio Roque da Silva e Kaline Rabelo. Porto Alegre: Bookman.
- [Flor04] FLORENTINO, A. (2004). *Fundamentos da educação 1*. v.1, Rio de Janeiro: Fundação Cecierj.
- [Fuk16] FUKUI, Ana. (org.) [et al.]. (2016). *Ser protagonista: física, 1º ano: ensino médio*. 3. ed. 1. São Paulo: SM.
- [Ger12] GERHARD, Ana C. FILHO, João B. da Rocha. (2012). *A fragmentação dos saberes na educação científica escolar na percepção de professores de uma escola de ensino médio*. *IENCI*. 17. 125-145. Retrieved from <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/210/144>.
- [Gor90] Gordon, J. E. (1990). *The New Science of Strong Materials*. Penguin, Books.
- [Guim14] GUIMARÃES, Osvaldo. PIQUEIRA, José R. CARRON, Wilson. (2014). *Física*. 1ª ed. 1. São Paulo: Ed. Ática.
- [Hall11] HALLIDAY, D. RESNICK, R. KRANE, K.S. (2011) *Física*. 5ª ed. 1. Rio de Janeiro: LTC.

- [Hall16] HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J. (2016). *Fundamentos de Física*. 10ª ed. 1: Mecânica. Rio de Janeiro: LTC.
- [Mer99] MERIAM, J. L. KRAIGE, L.G.(1999). *Mecânica – Dinâmica*. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC.
- [Mor11] MOREIRA, Marco Antonio. (2011). *Aprendizagem significativa: um conceito subjacente*. Porto Alegre- RS. *Aprendizagem significativa em Revista (Meaningful Learning Review)*. 1(3). 25-46.
- [Mor12] MOREIRA, M. A. (2012). *Aprendizagem Significativa: A teoria e textos complementares*. 1ª ed.. São Paulo: Livraria da Física.
- [Mor99] MOREIRA, M.A. (1999). *Aprendizagem significativa*. Brasília: Editora da UnB.
- [MukFer18] MUKAI, H. FERNANDES, P. R. G. (2018). *Manual de Laboratório de Física I*. Disponível em: <http://site.dfi.uem.br/downloads-apostilas/> Acesso em 17 de novembro de 2018.
- [NitsZanCar19] NITSCHKE, F. E. A., ZANATTA, S. C. e DE CARVALHO, H. A. P. (2019). *Uma proposta metodológica para o ensino do movimento oblíquo - o lançamento de foguete*. *Retratos da Escola*. 13(25). 291-304. doi: 10.22420.
- [Nova Escola – 2016] FERNANDES, E. (2011). *David Ausubel e a Aprendizagem Significativa*. Disponível em: <https://novaescola.org.br/conteudo/262/david-ausubel-e-a-aprendizagem-significativa> . Acesso em 08 de novembro de 2018.
- [Nus02] NUSSENZVEIG, H. Moysés. (2002). *Curso de Física Básica*. 1 – Mecânica. 4ª ed. São Paulo – SP: Edgar Blücher.
- [ParCiê08] PARANÁ, Secretaria do Estado da Educação. (2008). *Diretrizes Curriculares da Educação Básica – Ciências*. Curitiba – PR: Jam3 Comunicações.
- [ParFís08] PARANÁ, Secretaria do Estado da Educação. (2008). *Diretrizes Curriculares da Educação Básica – Física*. Curitiba – PR: Jam3 Comunicações.
- [Peix11] PEIXOTO, Aline Maria D. CRUZ, Edlane (2011). *O desafio do trabalho com gráficos no processo ensino-aprendizagem de geografia*. 13(3).127-168. Campos dos Goytacazes-RJ: Vértices.
- [PPC CEAT] Proposta Pedagógica Curricular para a disciplina de Física – Ensino Médio Organizado por Blocos de Disciplinas Semestrais. *CE Antonio Tortato – EMN*. Paranacity – PR.

[Per13] Peruzzo, J.A *Física através de experimentos - Termodinâmica, Ondulatória e Óptica* (2013). 1ª ed. 2. Irani – SC: Edição do autor.

[TomMar13] TOMAZI, Jeovania F. MARTINS, Suely A. *O Ensino Médio por Blocos de Disciplinas no Estado do Paraná: Uma análise a partir de consulta pública.*

Disponível em:

http://www.histedbr.fe.unicamp.br/acer_histedbr/jornada/jornada11/artigos/2/artigo_si_mposio_2_67_jeotomazi@gmail.com.pdf. Acesso em 17 de novembro de 2018.

[Tor13] TORRES, C. M.A., FERRARO, N. G., SOARES, P. A. de T., PENTEADO, P. C. M. (2013). *Física Ciência e Tecnologia 1 – Mecânica*, 3ª ed. São Paulo: Ed. Moderna.

[Zab98] ZABALA, Antoni. **A prática educativa: como ensinar**. Trad. Ernani F. da Rosa – Porto Alegre: ArtMed, 1998.<<https://novaescola.org.br/conteudo/262/david-ausubel-e-a-aprendizagem-significativa>>Acesso em 15 de novembro de 2018.

Anexo A: Termo de Autorização da Escola



Universidade Estadual de Maringá
Centro de Ciências Exatas
Departamento de Física
Programa de Pós-Graduação do Mestrado
Nacional Profissional em Ensino de Física

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

TERMO DE AUTORIZAÇÃO INSTITUCIONAL

Maringá, 29 de setembro de 2017.

À Diretora Elizângela Sabater Moreira
Diretora Colégio Estadual Antonio Tortato – Ensino Médio e Normal
Rua Mário Xavier de Souza, 1605 – Centro – Paranacity-PR – CEP: 87660-000

Prezada Diretora,

Venho por meio desta, apresentar o Pós-Graduando **FELIPE ENDO ARRUDA NITSCHKE** (RA 49891), acadêmico regularmente matriculado no Programa de **Pós Graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF)** da **Universidade Estadual de Maringá (UEM)**, desde 01/03/2017. Este desenvolve o trabalho intitulado provisoriamente: “CONSERVAÇÃO DA ENERGIA NO SISTEMA MASSA-MOLA: UMA PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO MÉDIO UTILIZANDO MATERIAIS DISPONIBILIZADOS PELO MEC” sob a orientação do Prof. Dr. Paulo Ricardo Garcia Fernandes.

Nesse sentido, solicitamos a autorização desta Escola para que o pós-graduando **FELIPE ENDO ARRUDA NITSCHKE** possa realizar a sua pesquisa para desenvolver e aplicar seu trabalho de mestrado no **COLÉGIO ESTADUAL ANTONIO TORTATO - EMN**, nas turmas da primeira série do Ensino Médio, respeitando o caráter ético e assegurando a preservação da identidade das pessoas participantes.

Esclarecendo que os acadêmicos do MNPEF são professores da rede de ensino que ministram a componente curricular Física ou Ciências, e que o trabalho de mestrado destes deve gerar um Produto Educacional e uma Dissertação explorando a validade de seu produto educacional. Solicitamos assim, a permissão para a divulgação do trabalho desenvolvido incluindo os resultados e suas respectivas conclusões da aplicação do Produto Educacional preservando sigilo e ética.

Por fim, nos colocamos à disposição para quaisquer esclarecimentos sobre o desenvolvimento do projeto de pesquisa que está sendo realizado.

Agradecemos vossa compreensão e colaboração.
Atenciosamente,



Prof. Dr. PAULO RICARDO GARCIA FERNANDES

Orientador
Coordenador do Programa de Pós-Graduação do Mestrado
Profissional em Ensino de Física (Polo UEM)

AUTORIZAÇÃO DA INSTITUIÇÃO:

Concordo com o solicitado:



ELIZÂNGELA SABATER MOREIRA
DIRETORA

Av. Colombo, 5.790 – Campus Universitário – CEP 87.020-900 – Bloco G56 – sala 022 – Maringá – PR
Fone: (44) 3011-5900 / e-mail: mnpef_uem@dfi.uem.br / site: <http://www.dfi.uem.br/dfimestrado/>

Anexo B: Declaração de revisão ortográfica

DECLARAÇÃO

Eu, **Maria Cristina Xavier**, portadora do RG: 3.554.443-7, residente no município de Paranacity, estado do Paraná, graduada em Letras (Português/Inglês) e atualmente Professora do Quadro Próprio do Magistério (QPM) pela Secretaria de Estado da Educação do Paraná, declaro para os devidos fins e a quem interessar que realizei a revisão ortográfica em Língua Portuguesa da dissertação de mestrado, bem como, do Produto Educacional: **LEI DE HOOKE E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA: UMA PROPOSTA EXPERIMENTAL APLICADA AO PRIMEIRO ANO DO ENSINO MÉDIO**; além da revisão ortográfica em língua inglesa da seção *Abstract* da referida dissertação de mestrado. Todos os trabalhos citados são de autoria de Felipe Endo Arruda Nitsche.

Por ser expressão da verdade, firmo a presente declaração.



Paranacity – PR, 10 de outubro de 2019.



-MARIA CRISTINA XAVIER-
RG: 3.554.443-7

APÊNDICE A: PRODUTO EDUCACIONAL

Neste apêndice apresenta-se o Produto Educacional de forma independente da dissertação, para facilitar seu uso e atender as normas do MNPEF/SBF.

<p>MNPEF Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física</p>	<p>U E MNPEF</p>  <p>Universidade Estadual de Maringá Centro de Ciências Exatas Departamento de Física Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física</p>	 <p>SBF SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA</p>
--	--	--

PRODUTO EDUCACIONAL

LEI DE HOOKE E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA: UMA PROPOSTA EXPERIMENTAL APLICADA AO PRIMEIRO ANO DO ENSINO MÉDIO

FELIPE ENDO ARRUDA NITSCHKE

MARINGÁ/PR
agosto/2019

PRODUTO EDUCACIONAL

LEI DE HOOKE E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA: UMA PROPOSTA EXPERIMENTAL APLICADA AO PRIMEIRO ANO DO ENSINO MÉDIO

FELIPE ENDO ARRUDA NITSCHKE

Este Produto Educacional compõe o trabalho de Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Estadual de Maringá como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo Garcia
Fernandes

MARINGÁ/PR
agosto – 2019

CARTA AO PROFESSOR

Caro Professor...

Sabemos das dificuldades enfrentadas por nós professores na sala de aula no que diz respeito à elaboração de estratégias didáticas que sejam motivadoras e atrativas aos nossos alunos; além disso, essas metodologias devem levar em consideração aquilo que é mais importante: a uma aprendizagem efetiva e com qualidade, que não se resuma em apenas atribuição de notas.

Destacamos, neste Produto Educacional, a importância de atividades práticas com a utilização de materiais simples, nesse caso, molas helicoidais e outros, a fim de desenvolver os conceitos físicos e matemáticos da Lei de Hooke e a relação dos materiais deformáveis com o princípio de conservação da energia mecânica.

A realização profissional e pessoal de todo professor é a satisfação e aprendizagem efetiva de seus alunos. Dessa forma acreditamos que é possível realizar atividades motivacionais e potencialmente significativas para o estudo da Física (tão temida pela grande maioria dos estudantes).

Nosso principal enfoque na construção desse material é justamente demonstrar que é possível sim, desenvolver aulas práticas no Ensino Médio, bem como, trabalhar com conceitos utilizando materiais que talvez ficassem guardados em caixas no laboratório de Física, de modo que não fossem explorados e utilizados para o desenvolvimento de novos conhecimentos.

Neste Produto Educacional você encontrará uma fundamentação teórica sobre os assuntos que serão abordados (que estará no Apêndice A, como um texto de apoio), bem como, questionários prévios e avaliativos além de roteiros de experimentos utilizando como princípio norteador a Lei de Hooke e o conceito da conservação de energia mecânica.

Os resultados obtidos com a aplicação e desenvolvimento deste Produto Educacional formaram requisitos para a realização do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, ao qual, convido o leitor a conhecer e fazer parte do programa, uma vez que é de extrema valia para o nosso crescimento profissional. Bom trabalho!

O Autor

Sumário

CARTA AO PROFESSOR	139
Apresentação	141
1. Kit Experimental e Experimentos Propostos	142
1.1 <i>Kit</i> Experimental - MEC	142
1.2 Roteiros Experimentais	145
2. Estrutura das Aulas	160
2.1 A sequência didática.....	160
2.2 Teoria de Aprendizagem - Ausubel.....	161
2.3 Ficha técnica da SD do Produto Educacional.....	23
2.4 Avaliação.....	167
2.4.1 Questionários sobre as concepções prévias (QPr)	167
2.4.2 Questionários sobre as concepções posteriores (QPo)	169
Considerações Finais	177
Referências	178
Apêndice A – Texto de Apoio	179
Apêndice B – Material para Impressão	220
Apêndice C – Expectativas de Aprendizagem/Resultados Esperados....	245

APRESENTAÇÃO

O principal objetivo deste Produto Educacional (PE) é instigar os estudantes a respeito do conceito de princípio de conservação de energia, a partir de experimentos utilizando-se molas helicoidais contidas em um dos *kits* de laboratório de Física disponibilizado pelo Ministério da Educação às escolas públicas do estado do Paraná.

Nesse *kit* encontra-se o material necessário para a montagem do sistema massa-mola; sistema, inclusive, considerado pelos professores e alunos das escolas sem ou pouca relevância. A partir dessa constatação, elaborou-se uma proposta de trabalho experimental utilizando o material já existente na escola com o intuito de discutir o princípio de conservação da energia.

A Diretriz Curricular do Estado do Paraná (DCE) para a componente curricular Física, propõe em seu conteúdo estruturante **Movimento** dois conteúdos classificados como básicos para a 1ª série do Ensino Médio, a saber: **energia e o princípio de conservação de energia e gravitação**. Ambos os conteúdos básicos propostos pela DCE de Física, devem ser desenvolvidos em sala de aula levando em consideração aspectos como o contexto sócio-histórico, além da teoria científica dos conteúdos. [ParFís08]

Considerando ainda, abordagens que enriqueçam o cotidiano dos estudantes por meio de problematizações para melhor compreensão das ideias e leis associadas a estes conteúdos básicos, presente sequência didática (SD), envolvendo a Lei de Hooke por intermédio da determinação da constante elástica de uma mola e a relação desta com a conservação de energia mecânica.

1. *Kit* Experimental e Experimentos Propostos

Apresentam-se neste capítulo, os materiais disponibilizados pelo MEC e os complementares, bem como, os experimentos e um roteiro experimental propostos para o uso dos mesmos.

1.1 *Kit* Experimental - MEC

O *kit* disponibilizado pelo Ministério da Educação (MEC) e encaminhado ao CEAT por meio da Secretaria de Estado da Educação do Paraná (SEED/PR), utilizado para elaboração e aplicação do presente PE, esteve guardado em um balcão de madeira no laboratório de Ciências Naturais do Colégio Estadual Antonio Tortato. A Figura 1.1 apresenta o *kit* utilizado na SD.



Figura 1.1 - Imagem fotográfica do conjunto experimental de mecânica utilizado na aplicação da SD e dado pelo MEC. FONTE: o autor.

Inicialmente esse conjunto de materiais continham apenas seis molas e pouquíssimas massas aferidas. Fez-se necessário então a adaptação de materiais. Houve ainda a necessidade de incluir ao *kit* molas com diâmetros diferentes aos já disponíveis nesse material, visto que para aplicar o presente PE completo é necessário no mínimo duas molas de mesmo tamanho diâmetro da mola e do fio iguais. Cabe ressaltar que os valores das massas são sugestões, mas que podem ser substituídos por outros, de materiais e valores

diferentes. Nesta perspectiva, faz-se necessário aferir os valores de novas massas a serem utilizadas, ressaltando que as massas não necessitam ter valores diferentes entre si, pois serão sobrepostas fornecendo valores diferentes. Essa adaptação contou com a inclusão de materiais que a própria escola já tinha e que também foram disponibilizados pelo Ministério da Educação (MEC) em momentos diferentes (Figura 2.2), tal que a lista de materiais necessários para realização dos experimentos aqui propostos são:

- Pares de molas com mesmo diâmetro e comprimento (inclusos na imagem da Figura 1.1);
- Cronômetro (Figura 1.2 (a)), pode-se utilizar cronômetro de celular;
- Suporte universal (Figura 1.2 (d) circulado em azul);
- Massas com gramaturas conhecidas (Figura 1.2 (b));
- Balança (não aparece nas imagens);
- Réguas de 30 cm e 100 cm (fixado no suporte com fita adesiva - Figura 1.2 (d));
- 1 carretel de Fio de algodão ou de nylon, para usar como suporte de massas diretamente na mola de acordo com o experimento;
- Paquímetro (Figura 1.2 (a)) – opcional, mas útil para verificar a espessura do diâmetro da mola, bem como a do fio;
- Suporte de massas (Figura 1.2 (c) circulado em vermelho) e Figura 1.2 (e);

O suporte de massas para uso no experimento 2 na conexão de duas molas em série, circulada em vermelho na Figura 1.2 (c), pode ser substituída por um sistema simples, constituído de 3 clips (2 de mesma tamanho), um pedaço retangular de capa de caderno (ou encadernação) do lado da espiral (em destaque), se for capa dura não há necessidade do pedaço de madeira (palito de sorvete por exemplo) como ilustrada na Figura 1.2 (e). Esclarecendo que o suporte pode ser substituído por outro desde que o sistema oscile somente na vertical e as forças atuem em equilíbrio.

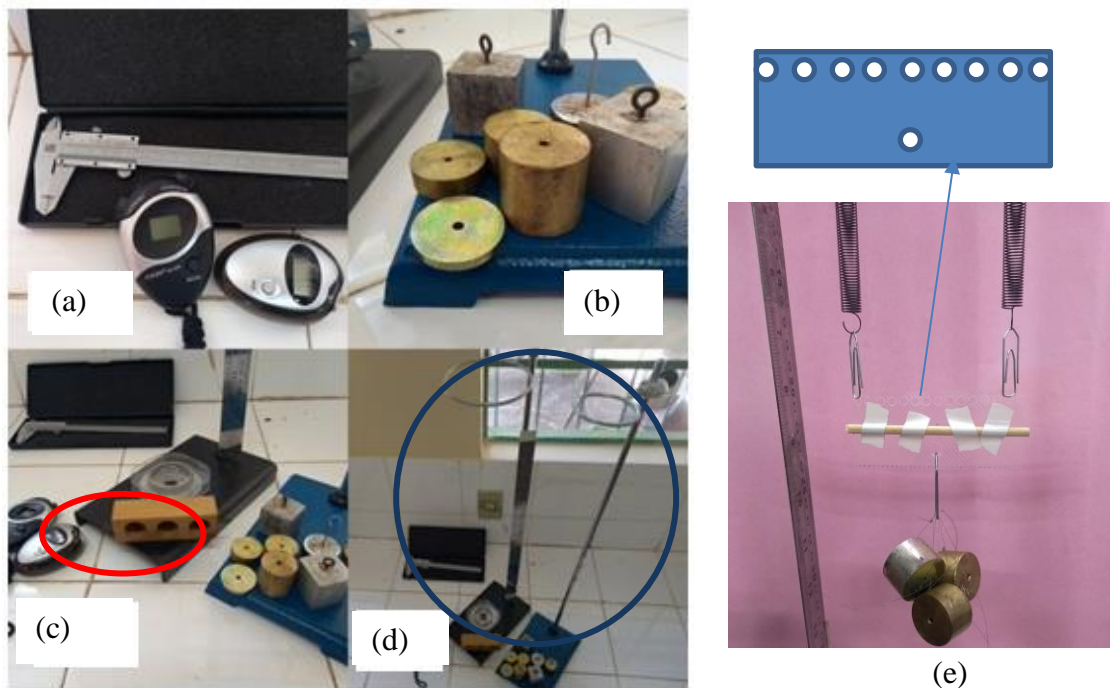


Figura 1.2 - Imagem fotográfica dos materiais incluídos no kit disponibilizado pelo MEC: (a) paquímetro¹ e cronômetros; (b) em destaque as massas com a gramatura gravada, que se encontram apresentadas em (c) e em (d); (c) base lateral para massas circulada em vermelho; (d) circulados em azul: suporte universal com o suporte lateral (arredondado) e régua, (e) em detalhes proposto pelo autor, um suporte para massas opcional ao de madeira (c). FONTE: o autor.

Os *kits* apresentados na Figura 1.1 e 1.2 foram utilizados nos experimentos relacionados à Lei de Hooke. E, para um dos experimentos, os materiais foram levados pelos próprios alunos, sendo materiais de fácil acesso, sendo esses:

- Recipiente com tampa (como por exemplo: lata vazia de leite em pó ou achocolatado, frasco de plástico de maionese);
- Parafuso com porca (ou bateria de 9 V usada, ou duas pilhas AA usadas);
- Elástico de dinheiro e/ou uma mola helicoidal;
- Pregos;
- Martelo e/ou um alicate
- Palito de fósforo ou Clps, ou palito de sorvete.

¹Utilizado pelo docente para verificar as dimensões da mola. Como fazer o uso do paquímetro: consultar referência [MukFer18].

1.2 Roteiros Experimentais

Para que haja mais clareza os experimentos pertencentes a esta sequência didática são:

- **Exp. 01** - Determinação da constante elástica de uma mola utilizando o método estático;
- **Exp. 02** - Determinação da constante elástica de uma mola utilizando o método dinâmico;
- **Exp. 03** - Determinação da constante elástica da mola utilizando a associação de molas em série e em paralelo;
- **Exp. 04** - Conservação de energia em materiais elásticos: o curioso caso da “lata energética”.

Os procedimentos experimentais selecionados para esta SD justificam-se pelo fato dos estudantes possuírem pouco contato com a determinação da constante elástica e a relação desta com um dos princípios fundamentais em Física: o princípio de conservação da energia mecânica durante a etapa de ensino médio. A seguir apresentamos os roteiros experimentais utilizados.

Quadro 1 - Roteiro experimental 01 (Exp. 01) - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - método estático. FONTE: o autor.

Exp. 01 - DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE ELÁSTICA DE UMA MOLA HELICOIDAL – MÉTODO ESTÁTICO

Objetivos:

Verificar a lei de Hooke e determinar a constante elástica de uma mola helicoidal utilizando o método estático.

Materiais Utilizados:

- 01 suporte universal;
- 01 haste vertical;
- 01 balança digital com aferição em gramas;
- 01 fixador metálico para pendurar a mola (suporte lateral);
- 01 régua de 30 cm;
- 01 fita adesiva;

01 tesoura sem ponta;

01 mola helicoidal (sugestão: mola com 1,5 cm de diâmetro e 15,00 cm de comprimento do kit de mecânica);

01 conjunto de massas de 20g cada (gramatura sugerida).

1 m de Fio de algodão ou de nylon.

Procedimento Experimental:

1. Montar os materiais necessários para o experimento conforme a Figura 1.3 (a). Utilize a fita adesiva para prender a régua de 30 cm na lateral da haste vertical (itens (5) e (2), respectivamente na Figura 1.3). Em (b) o destaque a altura para fixar a régua: a extremidade da mola deve estar alinhada na posição 0,00 cm da régua.

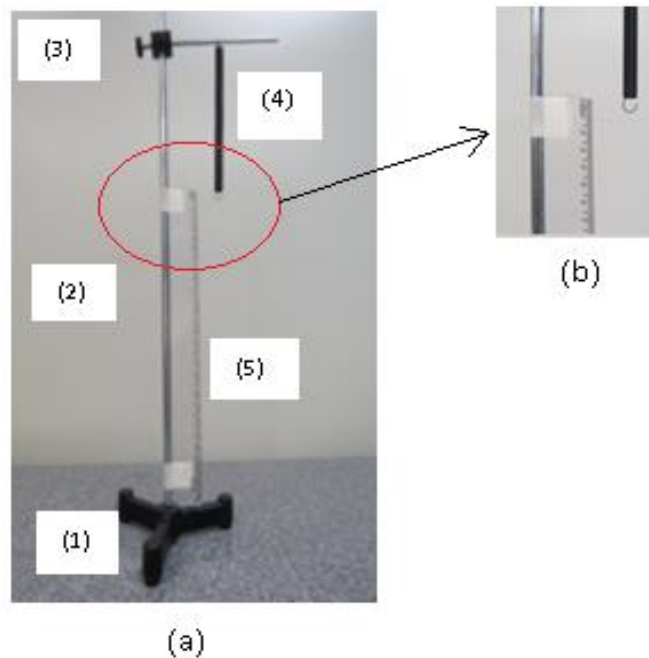


Figura 1.3 - (a) Foto da montagem inicial para determinação da constante elástica da mola A. Em que: (1) Base da haste; (2) Haste do suporte; (3) suporte lateral; (4) mola helicoidal; (5) régua. Em destaque (b) a indicação da posição do comprimento inicial da mola A, $L_0 = 0,00$ cm. FONTE: o autor.

2. Posicionar a extremidade inferior na mola A em $L_0 = 0,00$ cm, conforme a Figura 1.3 (b).
3. Meça a massa individual ou de cada conjunto (sugestão: iniciar com 60 g + suporte para massas). Se as massas são de valores não conhecidos, ou se utilizar um suporte cujo valor da massa não possa ser desprezado (oposto a de um pedaço de fio de nylon que é

desprezível) utilizar os valores do conjunto suspenso após realizar a aferição das mesmas em uma balança digital. Anote os dados das massas na Tabela 1.1; Caso a massa não tenha um gancho e seja vazado, utilize o fio de algodão ou de nylon como suporte para a massa, pegue um pedaço do fio, passe-o pelo orifício central da massa e de um nó em ambas as extremidades do fio (Figura 1.4 (a)) de forma que a mesma possa ser fixada no gancho existente na extremidade da mola. Repita para as demais massas o mesmo procedimento. Se necessário uma duas massas (Figura 1.4 (b)) pelo fio, formando 4 conjuntos de massas separados.



Figura 1.4 - Desenhos ilustrativos de como utilizar o fio de algodão ou de nylon como um suporte para massas: (a) uma única massa e em (b) visão frontal de mais de uma massa (no caso duas massas). FONTE: o autor.

4. Determine a força peso do conjunto, por meio da equação: $P = mg$, adotando $g = 980\text{cm/s}^2$, anotando o valor obtido na Tabela 1.1, na coluna: $F(N) = P$;
5. Prenda o conjunto (60 g (massas aferidas) + suporte para massas) na extremidade da mola;
6. Verifique a distensão $\Delta L = L - L_0$ sofrida pela mola, anotando o valor obtido na Tabela 1.1 (coluna ΔL (cm));
7. Retire o conjunto (60 g (massas aferidas) + suporte para massas) e verificar se a mola volta para a posição inicial $L_0 = 0,00$ cm.
8. Retorne o conjunto de massas na extremidade da mola e acrescente novas massas (sugestão 20 g) ao gancho suporte (pode ser um *clips*) repetindo os passos 2 a 8 completando a Tabela 1.1.
9. Calcule a constante elástica por meio da Equação [A12]: $k = \frac{F=P}{\Delta L}$,

preenchendo a Tabela 1.1, calcule a média aritmética simples da constante elástica;

Observação: Manteve-se o deslocamento como ΔL , pois caso não utilizem $L_o = 0,00 \text{ cm}$, basta subtrair o valor que a massa deslocou, L , do valor de L_o .

Tabela 1.1 - Dados para determinação da constante elástica da mola: massa (g) são os valores das massas individuais a ser colocada no suporte para pendurar na mola; m_T (g) é a massa total formada pelas massas individuais mais seu suporte; P a força peso do conjunto suspenso, ΔL (cm) o deslocamento causada para cada conjunto suspenso na mola, e k (dinas/cm) a constante elástica da mola a ser determinada. As massas escolhidas são sugestões. FONTE: o autor.

	Massa (g)	Massa Total m_T(g)	F (din) = $P = m_T g$	ΔL(cm)	$k = \frac{F = P}{\Delta L}$ (dinas/cm)
1	60				
2	80				
3	100				
4	120				
5	140				
Média aritmética da constante elástica (k) da mola					
Massa do Gancho: _____ g (se utilizar).					

Quadro 1.2 - Roteiro experimental 02 (Exp. 02) - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - método dinâmico. FONTE: o autor.

EXP. 02 - DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE ELÁSTICA DE UMA MOLA HELICOIDAL – MÉTODO DINÂMICO

Objetivos:

Verificar a lei de Hooke e determinar a constante elástica de uma mola helicoidal utilizando-se de movimentos oscilatórios.

Materiais Utilizados:

01 suporte universal;

01 haste vertical;

01 balança digital com aferição em gramas;

01 fixador metálico para pendurar a mola (suporte lateral);

01 régua de 30 cm;

01 fita adesiva;

01 tesoura sem ponta;

01 mola helicoidal (a mesma utilizada n Exp. 01);

01 conjunto de massas de 20g cada (sugestão: utilize as massas do Exp. 01, 20g cada, o ideal é utilizar uma quantidade total em que o movimento oscilatório permita uma boa aferição do tempo – faça testes para ver qual o melhor - esse valor permanecerá fixo).

01 suporte de massas ou utilizar o fio de algodão ou de nylon como suporte para as massas, conforme indicado na Figura 1.4;

01 cronômetro.

Procedimento Experimental:

1. Monte o sistema experimental, utilizando o suporte universal e prendendo com fita adesiva a régua de 30 cm na lateral da haste vertical, como apresentado na Figura 1.3 (a).
2. Posicione a extremidade inferior na mola A em $L_0 = 0,00$ cm (Figura 1.3 (b)).
3. Meça a massa do conjunto (massa + suporte para massas anote na Tabela 1.2); Para facilitar utilize as mesmas massas do Exp. 1 para formar o conjunto utilizado. Caso vá executar somente este experimento, prepare as massas conforme indicado na Figura 1.2.
4. Suspenda o conjunto (massa + suporte para massas) na extremidade da mola;
5. Puxe ou eleve (observe na régua o quanto foi alongada ou elevada, para que possa liberar sempre do mesmo ponto) manualmente a(s) massa(s) no sentido vertical tal que saia da posição de equilíbrio, solte o conjunto de massas e simultaneamente acione o cronômetro que deve estar zerado. Cronometre o tempo total para realizar três oscilações completas (1 oscilação completa = 1 período (T) = o processo ida e volta);
6. Para a mesma massa repita 10 vezes o processo do item 5. Lembre-se de zerar o cronômetro a cada tomada de tempo.
7. Determine o valor do período, T , de oscilação do sistema a partir dos valores médios dos tempos (tempo total dividido pelo número

de oscilações – nesse caso, três). Após, divida pelo número de repetições (no caso 10) para obter o valor do período médio. Anote os valores na (tempo total dividido pelo número de oscilações – nesse caso, três). Após, divida pelo número de repetições (no caso 10) para obter o valor do período médio. Anote os valores na Tabela 1.2.

Tabela 1.2: Tempos medidos e período médio para três oscilações completas, repetindo-se dez vezes o processo. FONTE: o autor

Processo (medida)	Tempo total medido (s)	Período médio (s)
01		
02		
03		
04		
05		
06		
07		
08		
09		
10		
Tempo de 01 Período das 10 repetições(T_m (s))		
Massa total suspensa (m(g))		

8. Para a determinação da constante elástica da mola helicoidal utilizada, remetemos à Equação [A.20]. Considerar $\pi = 3,14$. Usar o período médio (T_m) em T da Equação [A.20]: $k_{din.} = \frac{4 \pi^2 m}{T^2}$.

Quadro 3 - Roteiro experimental 03 (Exp. 03) - Determinação da constante elástica da mola helicoidal de forma dinâmica utilizando a associação de molas em série e em paralelo. FONTE: o autor.

EXP. 03 - DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE ELÁSTICA DE UMA MOLA UTILIZANDO A ASSOCIAÇÃO DE MOLAS EM SÉRIE E EM PARALELO.

Objetivos:

Verificar a lei de Hooke e determinar a constante elástica de duas molas helicoidais utilizando-se de configurações de associação de molas: série e paralelo.

Materiais Utilizados:

01 suporte universal;

01 haste vertical (presa ao suporte universal);
01 balança digital com medida em gramas;
01 fixador metálico para pendurar a mola (Suporte lateral/horizontal);
01 régua de 100 cm;
01 fita adesiva;
02 molas helicoidais de mesmo comprimento e diâmetro (sugestão: duas molas iguais a utilizada no Exp. 01);
01 conjunto contendo 07 a 08 massas aferidas com 20g cada (utilizar as mesmas massas do Exp. 01);
01 Suporte de massas ou utilizar o fio de algodão ou de nylon como suporte para as massas conforme indicado na Figura 1.4;

Procedimento Experimental:

Seguem-se a forma de execução do experimento da forma estática e dinâmica, para as associações em série (seção 3.1) e em paralelo (seção 3.2).

- **Associação em série**

1. Monte o sistema experimental da Figura 1.5, utilizando o suporte universal e prendendo com fita adesiva a régua de 100 cm na lateral da haste vertical (É a mesma montagem apresentada na Figura 1.3, somente posicionando a origem da régua na extremidade livre da mola inferior, pois as molas estão associadas em série, se necessário adote uma a régua mais longa);
2. Associe as molas em série (Figura 1.5 (a) ou (b)) e a massa m no gancho da mola suspensa no suporte lateral, conforme ilustrado na Figura 1.5 (a (2)) e (b).

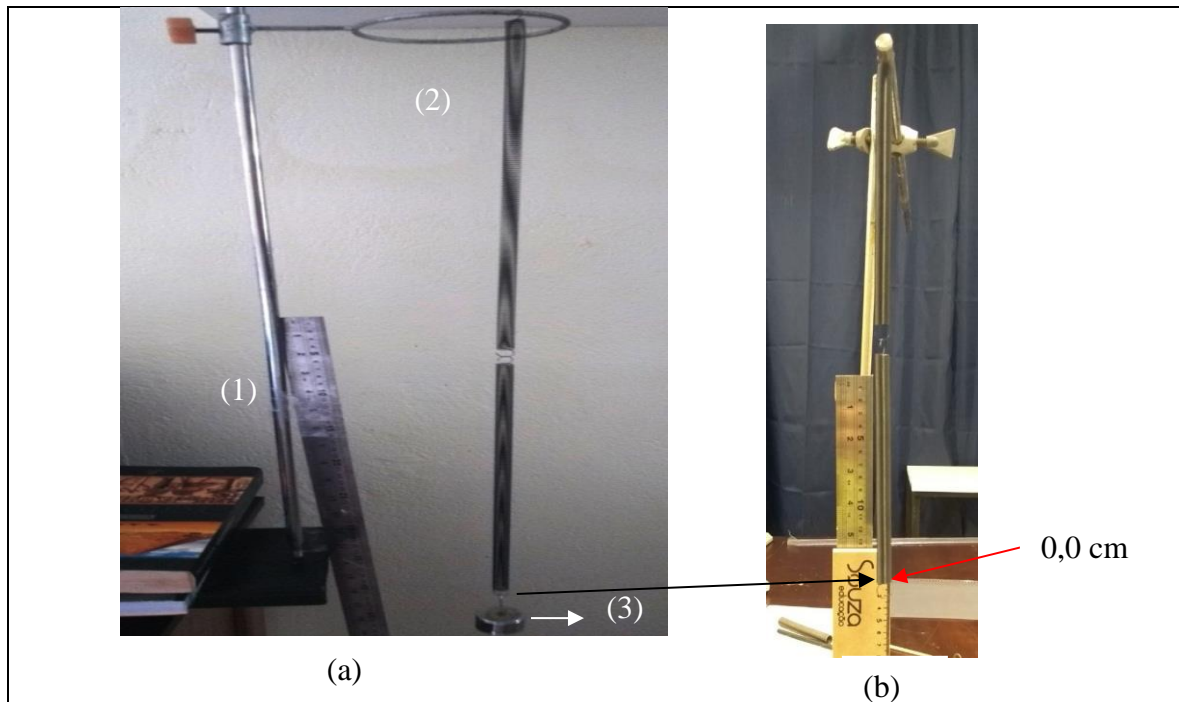


Figura 1.5 - Imagem fotográfica da montagem experimental, para duas molas associadas em série. Em (a (1)) o suporte universal apoiada na extremidade de uma mesa e fixada por meio de livros apoiadas sobre a mesma, desconsiderar a régua apoiada no suporte; (a(2)) suporte lateral (no caso, uma argola metálica) a qual uma das extremidades do sistema fica pendurado; (a(3)) massa m aferida suspensa na mola. (b) indicando a última espiral da mola na posição 0,00 cm da régua de madeira (utilizada por ser mais longa em relação a de metal) . FONTE: o autor.

➤ **Método Estático:**

3. Utilize a mesma sequência de massas já selecionadas, enumeradas e aferidas no Exp. 01, anote seus valores na sequência na Tabela 1.3 – parte estática;
4. Na sequência da enumeração, suspenda a massa 1 na mola inferior, e anote o deslocamento (ΔL (cm)) provocado pela massa no sentido vertical na Tabela 1.3.
5. Acrescente a massa 2, e repita o item 4;
6. *Repita o item 5, para as demais massas;*

➤ **Dinâmico:**

7. Escolha um conjunto de massa, sugestão utilizar o conjunto da parte dinâmica de 1 mola (Exp. 02) afira e anote sua massa m_T na Tabela 1.3. Caso vá executar somente este experimento, prepare as massas conforme indicado na Figura 1.3 (c).
8. Suspenda ou puxe a massa suspensa (anotar na régua o quanto foi

alongada, para liberar sempre do mesmo ponto) e ao liberar acione no mesmo instante o cronômetro, conte 3 oscilações completas, e trave o cronômetro. Anote o resultado do tempo, zere o cronometro e repita por mais 5 vezes. Caso a mola se mova no suporte, fixe-a com fita adesiva de forma que não atrapalhe o movimento oscilatório;

Tabela 1.3 – Dados: (a) método estático - do deslocamento para cada conjunto de massas suspensas a respectiva força peso e casa constante Elástica e sua média. (b) método dinâmico: tempo total (t) em segundos, de 3 períodos de oscilações determinados na associação em série de duas molas helicoidais. Em que a massa é uma massa m suspensa de valor fixo em gramas, Período médio do tempo de 3 oscilações e a média das 5 repetições. FONTE: o autor.

Estático				Dinâmico			
Massa(g)	Peso (dinas)	$\Delta L(cm)$	$k \left(\frac{dyn}{cm}\right)$	Massa (g)	Medida	Tempo total (t) de 3 oscilações completas em segundos	Período de oscilação (s) $T = \frac{t}{3}$
					1		
					2		
					3		
					4		
					5		
						$T_{médio}(s)$	
$k_m \left(\frac{dyn}{cm}\right)$						$k_{din} \left(\frac{dyn}{cm}\right)$	

9. Para comparar os resultados, determinar a constante elástica da série k_s , utilizando a Equação:

$$\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{1}{k_s} .$$

Usando as constantes elásticas k_1 e k_2 obtidas no Exp.01- método estático (lembre-se que as molas são iguais), e compare os resultados obtidos.

- **Associação em Paralelo**

1. Para a associação das molas em paralelo, monte o sistema experimental da Figura 1.6, utilizando o suporte universal e prendendo com fita adesiva a régua de 100 cm na lateral da haste vertical (É a mesma montagem apresentada na Figura 1.3 (Exp. 01), posicionando as molas tal que fiquem paralelas uma em relação a outra).
2. Fixe a massa conforme indicado na Figura 1.6 (qualquer uma das duas opções (a) ou (b)), essa deve ficar suspensa de forma equilibrada, ou seja, no ponto médio das duas molas;

Observação: Um sistema optativo para o suporte de massa indicado na Figura 1.6 (a), é o indicado na Figura 1.2 (e), cujo sistema todo montado é o da Figura 1.6 (b). Observando o uso de *clips*, para fixar o suporte nas molas, bem como um terceiro *clips* centralizado na parte inferior para pendurar as massas.

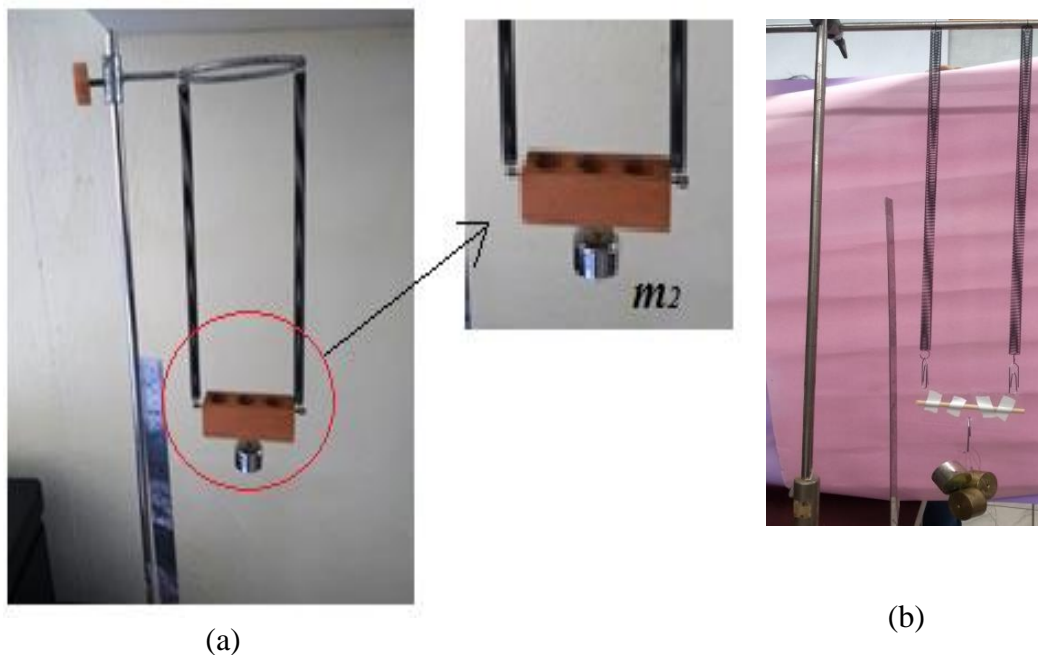


Figura 1.6 - Imagem fotográfica de duas molas associadas em paralelo no Exp. 03. (a) com o suporte de madeira do kit da instituição, em destaque, e em (b) o mesmo sistema, mas utilizando um suporte lateral em barra (fixar a extremidade da mola com fita adesiva) e o suporte de massas confeccionado pelo autor (Figura 1.2 (e)). FONTE: o Autor.

➤ **Método Estático**

3. Utilize a mesma sequência de massas já selecionadas, enumeradas e aferidas no Exp. 01, anote seus valores na sequência na Tabela 1.4 – parte

estática;

4. Na sequência da enumeração, suspenda a 1ª massa na mola inferior, e anote o deslocamento provocado pela massa no sentido vertical.
5. Repita o item 3) para as demais massas, acrescidas uma a uma e medindo o deslocamento (ΔL (cm)) ocorridos por cada conjunto suspenso; Anote os dados na Tabela 1.4.

➤ **Método Dinâmico**

6. Escolha um conjunto de massa, sugestão utilizar o conjunto da parte dinâmica de 1 mola (Exp. 02) aferir e anotar sua massa m (g) na Tabela 1.4.;
7. Fixe a massa conforme indicado na Figura 1.4, essa deve ficar suspensa de forma equilibrada, ou seja, no ponto médio das duas molas;
8. Eleve ou puxe na vertical o sistema suspenso pelo seu ponto médio e liberar a massa m_T (observe essa altura na régua para liberar sempre do mesmo ponto). Acione simultaneamente o cronômetro e trave quando contar 3 oscilações completas; Evite deslocar o sistema para os lados gerando movimentos aleatórios no sistema oscilante. Anote os dados na Tabela 1.4.
9. Zere o cronômetro a cada tomada de tempo;
10. Repita os itens 7 e 8 por mais cinco vezes, completando a Tabela 1.4.

Tabela 1.4 – Períodos de oscilações determinados na associação em paralelo de duas molas helicoidais. Dados (a) parte estática do deslocamento para cada conjunto de massas suspensas e (b) parte dinâmica: tempo total (t) em segundos, de 3 períodos de oscilações determinados na associação em série de duas molas helicoidais. Em que a massa é uma massa m suspensa de valor fixo em gramas, Período médio do tempo de 3 oscilações e a média das 5 repetições. FONTE: o autor.

Estático				Dinâmico			
Massa(g)	Peso (dinas)	ΔL (cm)	k (dyn/cm)	Massa (g)	Medida	Tempo total (t) de 3 oscilações completas em segundos	Período de oscilação (s) $T = \frac{t}{3}$
					1		
					2		

					3		
					4		
					5		
						$T_{\text{médio}}(\text{s})$	
$k_m \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}}\right)$						$k_{\text{din}} \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}}\right)$	

11. Determine a constante elástica da associação em paralelo, utilizando a

Equação [A.20]: $k_s = \frac{k_1 + k_2}{k_1 k_2}$;

12. Determine a constante elástica utilizando a Equação [A.8 b]: $k_p = k_1 + k_2$, com os dados das constantes elástica de cada mola obtidas pelo método estático (Exp. 01), lembrando que as molas são iguais ou devem ser iguais, no caso do experimento.

União dos dados dos Experimentos 1, 2 e 3:

➤ Método Estático

Complete a Tabela 1.5 a partir da repetição dos procedimentos listados. Da parte 1, 2 e 3 estática.

Tabela 1.5 – Dados da massa suspensa ($M(\text{g})$), sua força peso ($P(\text{dyn})$) aferidos os deslocamentos (ΔL) - método estático dos experimentos 1, 2 e 3. FONTE: o autor.

		1 mola	Molas em série	Molas em paralelo
Massa (g)	Força Peso (dinas)	ΔL (cm)	ΔL (cm)	ΔL (cm)

➤ Método dinâmico

Do Exp. 02, transfira o dado do período médio da Tabela 1.2 e coloque na Tabela 1.6. E, faça o mesmo com os dados do Exp. 03 da parte dinâmica, com os resultados da constante dinâmica obtida experimentalmente por meio

da Equação: $k_{din.} = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$. Anote também os resultados obtidos para a constante elástica equivalente da associação em série e em paralelo. Bem como o desvio percentual em relação ao valor experimental de valor mais próximo ao “real”.

Tabela 1.6 - Dados do período médio de 3 oscilações das Tabelas: 1.2, 1.3 e 1.4, obtidos da realização dos Experimentos 02 e 03 por meio do período médio e da massa oscilante e das equações que depende somente das constantes elásticas das molas, considerando as molas iguais. Apresentam-se também o desvio percentual. FONTE: o autor.

	Massa (g) utilizada	01 mola – Experimento 02	Associação em série – Exp. 03	Associação em paralelo – Exp. 03
$T_m(s)$				
$k_{dinâmico} \left(\frac{dyn}{cm}\right)$				
$k_s \left(\frac{dyn}{cm}\right)$				
$k_p \left(\frac{dyn}{cm}\right)$				
D(%)				

Quadro 4 - Roteiro experimental 04 (Exp. 04) - Conservação da Energia em materiais deformáveis - o curioso caso da “lata energética” a partir do armazenamento de energia potencial.

Experimento 04 (Exp. 04) - Conservação Energia em materiais deformáveis – O curioso caso da “lata energética” a partir do armazenamento de energia potencial.

Objetivo:

Construir um sistema de armazenamento de energia potencial.

Materiais Utilizados:

01 recipiente (lata ou um frasco de plástico tipo maionese vazio);

01 elástico do tipo chato contendo 5 mm de largura e 40 cm de comprimento;

01 mola helicoidal;

01 parafuso grosso com porca (tipo: 1/4 x 7/8 polegadas - 1 polegada (in) = 2,54 cm.);

02 palitos de fósforo;

03 pregos com cabeça (tipo: 17 x 21 polegadas);

01 martelo;

01 alicate.

Procedimento experimental:

1. Faça um furo centralizado, com o prego e o martelo, bem no meio da tampa do recipiente (lata ou frasco). Se necessário, aqueça a ponta do prego (segure o mesmo com um alicate) utilizando a chama de um fogão, ou leve o recipiente furado. (CUIDADO: faça esse procedimento com o auxílio de um adulto!).
2. Faça um segundo furo centralizado, agora no fundo do recipiente utilizando o prego e o martelo. Se for um recipiente de plástico utilize a mesma técnica de aquecer o do item 1, e fure o fundo do recipiente e sua tampa. Cuidado para não tocar no prego caso o aqueça;
3. Rosqueie a porca até a cabeça do parafuso.
4. Faça um nó no elástico e prender o mesmo entre o parafuso e a porca. Observe que o parafuso deve ficar no ponto médio no sentido mais longo do frasco, conforme indica a Figura 1.7.
5. Passe uma extremidade do elástico pelo furo, mantendo a outra extremidade do lado de fora da tampa preso com um palito. Passe a outra extremidade do elástico pelo outro furo, localizado no fundo do recipiente prendendo com outro palito (Figura 1.7). O recipiente deve estar bem fechado pelo elástico, ficando o parafuso e a porca na sua parte interna.

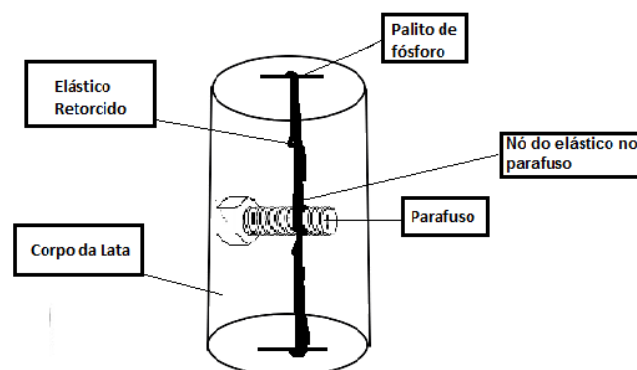


Figura 1.7 - Desenho ilustrativo da montagem da “lata energética”. FONTE: o autor.

6. Balance o recipiente de forma que o parafuso gire o elástico.
7. Coloque a lata/recipiente em uma superfície plana e observe o que ocorre.
8. Repita o procedimento 6 e colocar a “lata energética” em uma superfície que contenha uma pequena inclinação e observar o que acontece.
9. Substitua o conjunto elástico + parafuso por uma mola helicoidal e prendê-la nos furos contidos na lata com o auxílio de um prego (17 x 21). Utilize o alicate para ter mais precisão no momento em que for amarrar as extremidades da mola aos pregos.
10. Rosqueie um dos pregos da “lata energética” ao qual a mola está fixa e posicionar a lata/recipiente em uma superfície plana e impulsioná-la de modo que a mesma role.
11. Observe e discuta sobre o que acontece.

Observação: o passo 6, pode ser substituído dando um impulso na lata fazendo-a rolar na superfície.

2. Estrutura das Aulas

Toda aula deve antes de ser ministrada deve ser estruturada. A sequência didática aqui apresentada foi de acordo com as concepções de Antoni Zabala [Zab98] e a Teoria de aprendizagem utilizada a Teoria de Aprendizagem Significativa de David Ausubel (Mor99).

2.1 A sequência didática

O desenvolvimento da SD foi direcionado aos estudantes da Primeira Série do Ensino Médio de instituições públicas na qual realizaram medidas estáticas e dinâmicas com molas objetivando, inicialmente, a determinação da constante elástica das mesmas a partir de análises gráficas. Posteriormente, se buscou a correlação dos resultados experimentais com o conceito de conservação de energia mecânica.

A utilização de uma sequência didática sobre a Lei de Hooke e a conservação de energia mecânica – entre a energia potencial elástica e gravitacional acumulada em molas helicoidais em outra forma de energia, no caso energia cinética, evidencia-se no currículo para o Ensino Médio proposto pelas Diretrizes Curriculares do Estado do Paraná para a componente curricular Física, além da utilização dos materiais, até então “parados” no laboratório do colégio.

A elaboração desta sequência didática esteve em consonância com o descrito por Zabala (1998) que define esta ação como sendo:

[...] um conjunto de atividades ordenadas, estruturadas e articuladas para a realização de certos objetivos educacionais, que têm um princípio e um fim conhecidos tanto pelos professores como pelos alunos "(ZABALA,1998 - p.18).[Zab98]

Nesta perspectiva, podemos ainda dizer que uma sequência didática é uma sucessão de atividades elaboradas contendo questionamentos, experimentos, aulas expositivas, leituras comentadas, atitudes, procedimentos e ações em que os alunos executam uma determinada atividade mediada pelo professor. Estas atividades são

elaboradas de modo a aprofundar um determinado conteúdo ou tema a ser estudado e desenvolvido. Podem ser ainda utilizadas as mais variadas estratégias didáticas na execução da SD de modo que os estudantes possam ter aprofundado um determinado tema durante um conjunto² de aulas propostas.

Cabe ressaltar que esta SD não é mecânica, ou seja, ela pode ser realizada com adaptações feitas pelo professor. Uma sugestão para a aplicação desta SD seria iniciar a mesma pelo Exp. 04 – Conservação da Energia em materiais deformáveis: o curioso caso da “lata energética”.

Nesse caso, a ideia é demonstrar o experimento em questão de maneira investigativa, antes da aplicação de um questionário prévio; instigar a negociação, entre os estudantes, acerca de hipóteses relacionadas ao movimento da lata. O interessante nesta etapa estaria relacionado ao fato dos grupos proporem levantamentos diferentes inerentes ao movimento realizado pela “lata energética”.

E, após a realização dos demais experimentos (Exp. 01, 02 e 03) que envolvem o sistema massa-mola, os estudantes poderiam construir suas próprias “latas energéticas”, retomando assim, a problematização inicial de forma que os alunos tenham uma visão mais sistêmica dos conteúdos desenvolvidos.

O que pretendemos, de maneira geral e independente da forma de aplicação desta SD, é a relevância de alguns aspectos em sala de aula, tais como: a importância do trabalho em equipe; a negociação de conceitos; o levantamento de hipóteses a partir de uma problematização e, o processo de investigação. Estes aspectos sustentam a aprendizagem significativa definida na próxima seção.

2.2 Teoria de Aprendizagem – Ausubel

Sobre o termo *aprendizagem significativa*, temos a seguinte definição proposta por Ausubel:

A aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação ancora-se em conceitos ou preposições relevantes, preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz. [...] O armazenamento de informações no cérebro humano como sendo organizado, formando uma hierarquia conceitual, na

² Este conjunto de aulas dependerá da quantidade de aulas que o professor considere relevante para desenvolver um determinado tema. Os aprofundamentos, bem como, as estratégias a serem utilizadas pelo professor devem estar em consonância com o proposto para cada ano/série nos currículos norteadores.

qual elementos mais específicos de conhecimento são ligados (e assimilados) a conceitos mais gerais, mais inclusivos. (MOREIRA, 1999 – p.161). [Mor99]

David Paul Ausubel (1918-2008) fora um dos maiores psicólogos norte americano tendo sofrido desvalorização de seu trabalho por educadores por ter descendência judaica. As ideias behavioristas predominavam até a apresentação de sua teoria em 1963 tendo como principais propostas a mudança de paradigmas e concepções pelos estudantes. [Mor99] Para Ausubel, aprender significativamente é ampliar e reconfigurar ideias já existentes na estrutura mental. [Nova Escola – 2016]

Neste trabalho, optamos pela aplicação de questionários prévios e pós-aplicações contendo questões dissertativas e não objetivas (contendo alternativas de múltipla escolha) baseando-se justamente na proposta de uma aprendizagem significativa, uma vez que a análise consistiu no que fora produzido pelos estudantes durante a realização da sequência didática (SD) proposta.

Desta forma, foi possível realizar uma pesquisa mais minuciosa que levasse em conta a produção escrita dos estudantes, bem como a comparação dos questionários prévios e pós-realizações dos experimentos.

De acordo com Ausubel, as concepções prévias dos estudantes devem ser levadas em consideração como ponto de partida uma vez que estes devem nortear o trabalho desenvolvido e sua reconfiguração na chamada estrutura cognitiva⁵¹.

Ainda de acordo com a teoria proposta por Ausubel um fator isolado de aprendizagem está relacionado com o conhecimento que o aluno já sabe acerca de um determinado conceito ou conteúdo cabendo ao professor identificar e ensinar de acordo com essas concepções prévias oriundas destes indivíduos. Partindo desta concepção é cabível que:

[...] o uso de *organizadores prévios* sirvam de âncora para a nova aprendizagem e levem ao desenvolvimento de conceitos subsunçores⁵² que facilitem a aprendizagem subsequente. O uso de organizadores prévios é uma estratégia proposta por Ausubel para, deliberadamente, manipular a estrutura cognitiva, a fim de facilitar a aprendizagem significativa. Organizadores prévios são materiais introdutórios apresentados antes do material a ser aprendido em si. (Moreira, 1999 – p. 163). [Mor99]

⁵¹Ausubel define como estrutura cognitiva a estrutura hierárquica de conceitos que são representações de experiências sensoriais do indivíduo. (Moreira, 1999 – p.161).

⁵²Conceitos e preposições estáveis no indivíduo. Em outras palavras, são as “pontes” para novas aprendizagens.

E, esses são os pontos principais que nortearam didaticamente a elaboração desta SD.

Na próxima seção apresenta-se a Ficha Técnica da SD

2.3 Fichas técnica da SD do Produto Educacional

Apresentamos no Quadro 2.1, a “Ficha Técnica” acerca desta sequência didática no intuito de facilitar e deixar mais claro o entendimento deste produto educacional e de sua aplicação junto aos estudantes. Esta ficha contém a descrição dos questionários aplicados aos estudantes, bem como, relaciona os experimentos utilizados na sequência didática proposta. O Quadro 2.2, apresenta um cronograma programático que serve como orientação para o professor desenvolver a série de experimentos a serem realizadas.

Quadro 2.1 - Cronograma programático para orientação na aplicação da sequência didática. FONTE: o autor.

TEMA - Lei de Hooke e Conservação de Energia	
CRONOGRAMA DE APLICAÇÃO	
ESCOLA: _____	
MUNICÍPIO: _____	
PROFESSOR REGENTE: _____	
PÚBLICO ALVO: _____	
COMPONENTE CURRICULAR: _____	
CONTEÚDOS	<p>Conceituais:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Lei de Hooke: Força elástica; -Constante elástica de uma mola: método estático e dinâmico; -Princípio da Conservação de energia mecânica. <p>Procedimentais</p> <ul style="list-style-type: none"> -Medições da constante elástica de uma mola helicoidal utilizando-se de métodos diferentes. -Confecção, leitura e interpretação de gráficos e tabelas. -Relação do Princípio de Conservação de Energia Mecânica com a Lei de Hooke e outros sistemas elásticos, por meio de uma sequência didática.

	<p>Atitudinais:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Proporcionar e estimular o trabalho em grupo. -Inserir momentos de cooperação entre os estudantes nos momentos de realização das atividades práticas. -Estabelecer meios nos quais os estudantes possam sentir-se estimulados a desenvolver os conteúdos da Física.
OBJETIVOS	<ul style="list-style-type: none"> - Determinação da constante elástica da mola em diferentes configurações por dois métodos: estático e dinâmico; - Aplicar a lei de Hooke. - Desenvolver atividades práticas com <i>kits</i> de materiais que a escola já possui. - Realizar interpretação física e matemática em sistemas massa-mola. - Proporcionar o trabalho em grupo, cooperativo. - Desenvolver a expressão oral e escrita dos estudantes. - Realizar experimentação com sistema massa-mola e em um elástico contorcido e verificar a conservação de energia em tal sistema de modo a entender energia como entidade física que pode se manifestar de diversas formas e, no caso da energia mecânica, em energias cinética, potencial elástica e gravitacional.
AVALIAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> -Interpretação física e matemática acerca dos experimentos realizados com sistema massa-mola e a transformação de energia potencial elástica em energia cinética de uma forma lúdica, visando à aprendizagem significativa de D. Ausubel a partir da análise dos questionários respondidos pelos alunos. - Impressão registrada pelo docente, durante e após a aplicação do PE em relação à reação atitudinais dos alunos.

Para a aplicação da SD, conforme a Ficha Técnica apresentada no Quadro 2.1, as aulas foram distribuídas conforme cronograma apresentado no Quadro 2.2.

Nesse também contém uma proposta contendo as respectivas atividades para cada aula. Sendo cada uma das aulas de 50 minutos. Incluiu-se também a atividade

docente, em que o docente utilizará para analisar as informações adquiridas durante as aulas e seguir com a aplicação da SD. Fato esse importante para o processo ensino-aprendizagem. Pois ao ir analisando cada etapa é possível reestruturar se necessário for.

Esclarecendo que o docente pode escolher quais partes quer trabalhar com os alunos, os Experimentos são independentes entre si. Dando também a liberdade de forma que possam relacionar uns aos outros, como o aqui proposto em relacionar os resultados obtidos dos Exp. 02 e 03, para uma interpretação via equação e/ou gráficos.

Quadro 2.2 – Cronograma de Aplicação da SD. Em que QPr se refere ao questionário prévio e QPo ao questionário pós aplicação dos experimentos. FONTE: o autor.

CRONOGRAMA DE APLICAÇÃO DA SD		
Data	ATIVIDADE DESENVOLVIDA	Nº de aulas³ previstas
	Determinação da constante elástica da mola – modo estático: Concepções prévias dos estudantes. Aplicação de questionário descritivo (QPr1).	02 horas/aulas.
	Determinação da constante elástica da mola – método estático: Realização do Exp. 01 conforme roteiro contido no PE. Aplicação de questionário acerca do experimento (QPr1).	04 horas/aulas.
	Análise das concepções prévias (QPr1) e comparação das mesmas com o questionário aplicado após a realização do experimento (QPo1), conforme D. Ausubel.	Atividade docente
	Determinação da constante elástica da mola – modo dinâmico: Concepções prévias dos estudantes. Aplicação de questionário descritivo (QPr2).	02 horas/aula.
	Determinação da constante elástica da mola –	04 horas/aula.

³ Considerando a hora-aula de 50 minutos.

	método <i>dinâmico</i> : Realização do Exp. 02 conforme roteiro contido no PE, pela turma da 1ª série <i>B</i> Aplicação de questionário acerca do experimento (QPo2).	
	Análise das concepções prévias (QPr2) e comparação das mesmas com o questionário aplicado após a realização do experimento (QPo2), conforme D. Ausubel.	Atividade docente
	<i>Associação de molas em série</i> e determinação da constante elástica da mola: Aplicação de questionário com concepções prévias para a turma <i>B</i> (QPr3).	02 horas aulas (aplicado em contraturno)
	<i>Associação de molas em série</i> e determinação da constante elástica. Realização do Exp. 03 , conforme roteiro contido no PE. Aplicação de questionário acerca do experimento (QPo3).	04 horas aulas (aplicado em contraturno)
	<i>Associação de molas em paralelo</i> e determinação da constante elástica da mola: Aplicação de questionário com concepções prévias para a turma <i>B</i> (QPr4).	02 horas aulas (aplicado em contraturno)
	<i>Associação de molas em paralelo</i> e determinação da constante elástica: Realização do Exp. 03 , conforme roteiro contido no PE. Aplicação de questionário acerca do experimento (QPo4).	04 horas aulas (aplicado em contraturno)
	A “ <i>lata energética</i> ” - Armazenamento de energia potencial elástica em molas e conservação de energia mecânica: Aplicação de questionário prévio (QPr5).	01 hora aula.
	A “ <i>lata energética</i> ” - Armazenamento de energia potencial elástica em molas e conservação de energia mecânica: Realização do Exp. 04 e aplicação do questionário posterior (QPo5).	04 horas aulas (aplicado em contraturno)

	Análise das concepções prévias (QPr3, QPr4 e QPr5) e comparação das mesmas com os questionários aplicados após (QPo3, QPo4 e QPo5) a realização dos referidos experimentos, conforme D. Ausubel, que visa uma aprendizagem significativa.	Atividade docente
--	---	-------------------

2.4 Avaliação

Como o objetivo principal do PE utilizado nesta sequência didática é a compreensão dos estudantes sobre um fenômeno físico. Ao utilizarmos a teoria de aprendizagem significativa, proposta por D. Ausubel como suporte avaliativo desta SD, queremos observar os avanços alcançados pelos estudantes no que diz respeito à compreensão do conteúdo físico aplicado. Para que a avaliação fosse o mais coerente possível propomos aos estudantes a resolução de questionários de concepções prévias, que foram aplicados antes da realização dos experimentos propostos na SD.

Além dos questionários, algumas atividades extras, tais como, resolução de cálculos matemáticos relacionando a lei de Hooke, construção de gráficos em papel milimetrado e via programa computacional Microsoft Excel® e resolução de situações problemas, fizeram parte do processo avaliativo embora que não substituísse a significação de conceitos, bem como a construção de novos conhecimentos adquiridos pelos estudantes.

Apresentam-se a seguir os questionários prévios (QPr) e posterior (QPo) a cada execução experimental.

2.4.1 Questionários sobre as concepções prévias (QPr)

Cabe frisar que os questionários de concepções prévias (QPr) foram aplicados um por vez, conforme apresentado no Quadro 2.2, e na sequência apresentada na Figura 2.1.

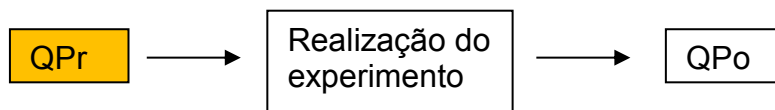


Figura 2.1 - Desenho esquemático indicado o momento em que será aplicado o QPr no contexto da SD. FONTE: o autor

Lembrando que o será um tipo de Interpretação e Análise dos resultados obtidos em cada experimento. Nos Quadros 2.3 a 2.6 apresentam os questionários prévios (QPr) a ser desenvolvidos com o grupo de alunos participantes.

Quadro 2.3 - Questionário 01 de concepções prévias (QPr1) aplicado aos estudantes antes da realização do Exp. 01 - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - Lei de Hooke - Método Estático. FONTE: o autor.

Questionário 01 - Concepções prévias: Lei de Hooke – método estático.

01. O que você entende por elasticidade?
02. O que você entende por materiais deformáveis?
03. Como você diferenciaria materiais deformáveis de materiais indeformáveis?
04. O que você sabe sobre a Lei de Hooke?
05. O que entende por constante elástica?
06. Como você relacionaria um sistema massa-mola com a conservação de energia?

Quadro 2.4 - Questionário 02 de concepções prévias (QPr2) aplicado aos estudantes antes da realização do Exp. 02: Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal: Lei de Hooke- Método Dinâmico. FONTE: o autor.

Questionário 02 - Concepções prévias: Lei de Hooke – método dinâmico

01. Você acha que seria possível determinar a constante elástica de uma mola usando-se movimentos oscilatórios?
02. Qual a sua definição para movimento oscilatório?
03. De acordo com a etapa I que você realizou, é possível chegar a um mesmo valor de k usando-se procedimentos diferentes?
04. De acordo com suas concepções, qual(is) é (são) o(s) principal (is) erro(s) que pode(m) ocorrer na realização da etapa II (caso dinâmico) para determinar a constante elástica de uma mola?

Quadro 2.5 - Este questionário de concepções prévias, Questionário 03 (QPr3), foi aplicado aos estudantes antes da realização do Exp. 03 - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal: Lei de Hooke - Associação de molas em Série e em Paralelo. FONTE: o autor.

Questionário 03 - Concepções prévias: Lei de Hooke – Associação de molas em série e em paralelo.

01. O que você entende por associação de molas?
02. Você acha ser possível determinar a constante elástica de mais de uma mola por vez? Como?
03. Qual deve ser o valor teórico da constante elástica da associação em série, de acordo com seu raciocínio? (o dobro, a metade ou a raiz quadrada da constante de uma das molas).
04. Qual deve ser o valor teórico da constante elástica da associação em paralelo, de acordo com seu raciocínio? (o dobro, a metade ou a raiz quadrada da constante de uma das molas).
05. Você acha que ao se utilizar mais de uma mola e tentamos determinar sua constante elástica, estamos mais propensos ao erro? Por quê?
06. Como você relacionaria uma associação de molas (em série ou em paralelo) com o princípio de conservação de energia?

Quadro 2.6 - Questionário 04 de concepções prévias (QPr4) aplicado aos estudantes antes da realização do Exp. 04 - Conservação de energia em materiais elásticos: o curioso caso da “lata energética”. FONTE: o autor.

Questionário 04 - Concepções prévias - Armazenamento de energia potencial e Conservação de Energia Mecânica – O curioso caso da “lata energética”.

01. Você acha ser possível construir um sistema de armazenamento de energia? Como você o faria?
02. Qual a relação entre uma mola helicoidal com um elástico?
03. Como a energia mecânica pode estar associada em um sistema massa-mola?
04. O que você entende por transformação de energia?
05. O que você entende por energia potencial elástica?

2.4.2 Questionários sobre as concepções posteriores (QPo)

Além dos questionários, algumas atividades extras, tais como, resolução de cálculos matemáticos e situações problemas, relacionando a lei de Hooke,

confeção de gráficos, em papel milimetrado, e o uso do programa de computador Microsoft Excel ® fazem parte do processo avaliativo embora não substitua a significação de conceitos, bem como a construção de novos conhecimentos adquiridos pelos estudantes.

Os questionários contidos nesta seção foram aplicados aos estudantes após a realização de cada experimento, conforme ilustra o momento de aplicação na Figura 2.2.

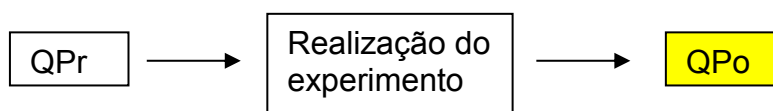


Figura 2.2 - Desenho esquemático indicado o momento em que será aplicado o QPo no contexto da SD. FONTE: o autor

Assim como na etapa de concepções prévias, sugere-se que os estudantes respondam individualmente as perguntas propostas nessa etapa da SD já que a análise necessária é comparativa às respostas dadas previamente pelos alunos.

Ressalta-se que os questionários avaliativos (QPo) apresentados são diferentes se comparados aos de concepções prévias (QPr). Isso se justifica no fato das questões apresentadas possuírem caráter mais técnico em relação aos primeiros questionários. Outro fator importante a se elencar é o fato das questões serem descritivas. Haja a vista que a proposta é analisar as respostas dos estudantes de acordo com a concepção de Ausubel – aprendizagem significativa – optamos por utilizar este tipo de questão, pois permite uma gama maior de tipos de respostas (certas ou não) relacionadas a um determinado fenômeno físico a ser difundido na realização da pesquisa.

Os questionários avaliativos estão dispostos nos Quadros 2.11 ao 2.14. O conteúdo desses quadros é um tipo de interpretação dos dados obtidos por meio dos experimentos para atingir o objetivo que cada experimento propõe.

Quadro 2.11 - Questionário Avaliativo 01 (QPo1) aplicado posteriormente à realização do Experimento 01. FONTE: o autor.

QPo1 - Lei de Hooke – caso estático.
a) O que aconteceu com os valores de ΔL , à medida que F aumentou?
b) Confeccione numa folha de papel milimetrado (Figura 2.3) o gráfico da força F

em função do deslocamento ΔL , causada por essa força.

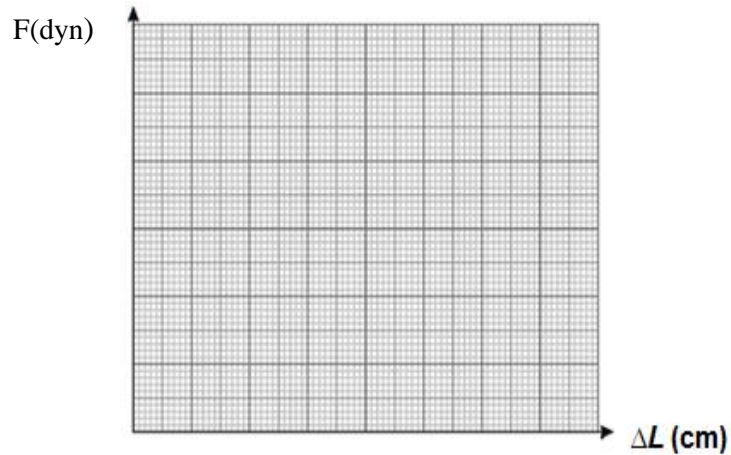


Figura 2.3 - Gráfico da força ($F = P$) em dinas (dyn) versus a variação de distensão da mola (ΔL) medida em centímetros (cm). FONTE: o autor.

- c) Qual é a relação existente entre F e ΔL ?
- d) Sendo uma relação linear entre F e ΔL , trace uma reta média entre os pontos experimentais obtidos e determine o coeficiente angular dessa reta com suas respectivas unidades.
- e) Sendo uma relação linear entre F e ΔL , trace uma reta média entre os pontos experimentais obtidos e determine o coeficiente linear dessa reta.
- f) Qual é o significado físico dos coeficientes angular e linear obtidos nos itens “d” e “e”?
- g) A mola ultrapassou o limite de elasticidade? O que seria esse limite de elasticidade?
- h) Os resultados obtidos comprovam a lei de Hooke? Em caso afirmativo, enuncie a lei.

Quadro 2.11 - Questionário Avaliativo 02 (QPo2) aplicado após a realização do Exp. 02. FONTE: o autor.

QPo2 - Lei de Hooke – Método dinâmico

- a) Determine a constante elástica, utilizando-se do processo dinâmico (lembrando-se que se trata de movimento oscilatório).
- b) O valor de k obtido foi o mesmo em relação ao que o grupo conseguiu no processo estático?

- c) A mola ultrapassou o limite de elasticidade? O que seria esse limite de elasticidade?
- d) Os resultados obtidos comprovam a lei de Hooke? Como pode afirmar isso?
- e) Quais foram as dificuldades e facilidades que você pode apontar na realização deste experimento?

Quadro 2.12 - Questionário Avaliativo 03 (QPo3) aplicado após a realização do Exp. 03. FONTE: o autor.

QPo3 - Lei de Hooke – Associação de molas em série e em paralelo.

- a) Calcular o valor da constante elástica (experimental) da associação em série.
- b) Calcular o valor da constante elástica (experimental) da associação em paralelo.
- c) Destacar as principais diferenças entre a associação de molas helicoidais em série e em paralelo.
- d) Confeccionar o gráfico que relaciona a força peso da associação em série versus o deslocamento, de preferência em papel milimetrado (Figura 2.4). Para isso utilize os dados da Tabela 1.3 referente ao Exp. 03 – Série/Estático.

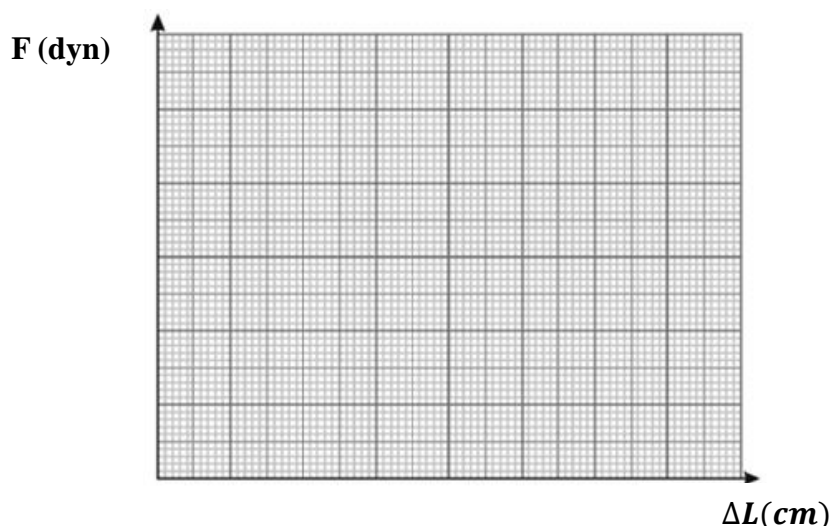


Figura 2.4 - Gráfico da força peso (F) em dinas (dyn) da associação de duas molas iguais em série versus o deslocamento (ΔL) cm. FONTE: o autor.

- 3. Confeccionar o gráfico que relaciona a força peso da associação em paralelo versus o deslocamento, de preferência em papel milimetrado (Figura 2.5). Para isso utilize os dados da Tabela 1.4 referente ao Exp. 03 -

Paralelo/Estático.

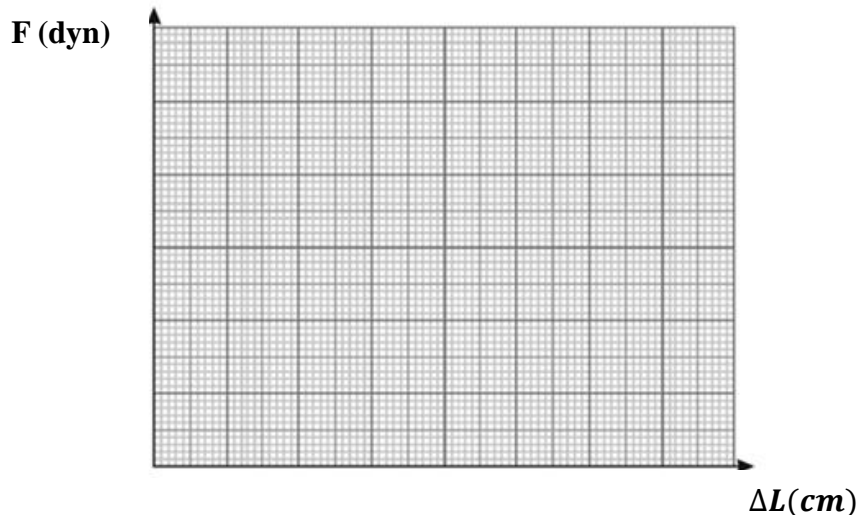


Figura 2.5 - Gráfico da força peso (F) em dinas (dyn) da associação em paralelo de duas molas iguais versus o deslocamento (ΔL) cm. FONTE: o autor.

A partir da confecção dos gráficos, indique o valor numérico dos quocientes de uma única mola e de ambas as associações que correspondem à inclinação dos gráficos. E, compare os resultados quando obtidos por meio das equações, complete a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores das constantes elásticas obtidas por meio das Equações e considerando a média dos valores e por meio da inclinação das retas dos gráficos. E, o cálculo do desvio percentual em relação os valores mais próximos.FONTE: o autor.

	Caso estático			Caso Dinâmico		
	1 mola	Molas em série	Molas em Paralelo	1 mola	Molas em série	Molas em Paralelo
	k_1 (dyn/cm)	k_s (dyn/cm)	k_p (dyn/cm)	k_1 (dyn/cm)	k_s (dyn/cm)	k_p (dyn/cm)
Equação/Teoria						
Equação/Média						
Gráfico (reta ajustada)						
$D\%$ (%)						

Sugestão:

- Confeccionar os três gráficos da parte estática para a mesma massa,

em uma única figura e analisar a inclinação das retas.

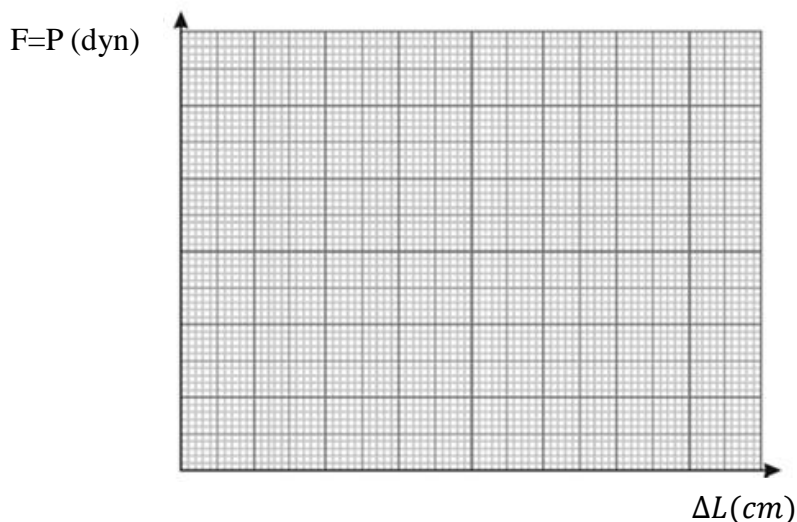


Figura 2.6 - Gráfico da parte estática da força peso ($F = P$) em dinas (dyn) versus o deslocamento (ΔL) cm para uma mola (mola 1), e as configurações em série e em paralelo para duas molas iguais a mola 1. Confeccionado com os dados da Tabela . FONTE: o autor.

b) Comparar os períodos do movimento oscilatório.

Complete a Tabela 2.2, e analise os resultados.

Tabela 2.2 - Dados dos períodos médios para cada sistema massa-mola: mola de cm e diâmetro de cm e massa de g. Extraídos das Tabelas 2.4; 2.5 e 2.6. Fonte: o autor.

Configuração	Período médio ($T_m(s)$)	
1 mola	$T_1(s)$	
Molas série	$T_s(s)$	
Molas paralelo	$T_p(s)$	

4. Relate as principais dificuldades encontradas na realização do experimento.
5. Relate também as suas considerações favoráveis em relação ao experimento.

Quadro 2.13 - Questionário Avaliativo 04 (QP04) aplicado após a realização do Exp. 04. FONTE: o autor.

QP04 - Conservação de Energia Mecânica e Armazenamento de Energia Potencial Elástica – O curioso caso da “lata energética”.

- a) Qual a função, da lata/recipiente, do elástico e do parafuso com a porca?
- b) Que tipos de transformação de energia estão envolvidos no comportamento da lata/recipiente nas duas situações (quando rodada na superfície horizontal e quando colocada na rampa)?
- c) Que modificações você propõe para que a lata/recipiente atinja maior

alcance ao ser rodada na superfície horizontal?

- d) É possível substituir o elástico retorcido por uma mola helicoidal? O sistema funcionaria da mesma forma?
- e) Descreva o processo realizado para fazer a lata/recipiente rolar.
- f) Com base em sua resposta no item “e”, quais transformações de energia ocorrem nesse caso?

Os Questionários de Concepções Prévias, os Experimentos e os Questionários Posteriores estão dispostos no próximo capítulo, prontos para serem impressos e utilizados. E, no Apêndice B, C e D apresenta-se o gabarito desses questionários e um exemplo do que se espera como resultado experimental.

Para que a avaliação fosse o mais coerente possível propomos aos estudantes a resolução de questionários de concepções prévias (QPr), que foram aplicados antes da realização dos experimentos propostos na sequência didática (SD).

Os procedimentos experimentais (Exp.) selecionados para esta SD justificam-se pelo fato dos estudantes possuírem pouco contato com a determinação da constante elástica e a relação desta com um dos princípios fundamentais em Física: o princípio de conservação da energia mecânica durante a etapa de ensino médio.

Os questionários aplicados aos estudantes após a realização de cada experimento (QPo), serão respondidos individualmente e contém questões propostas acerca do experimento realizado anterior a cada QPo da SD já que a análise necessária é comparativa às respostas dadas previamente pelos alunos.

Ressalta-se como foi apresentado, que os questionários avaliativos apresentados são diferentes se comparados aos de concepções prévias (QPr). Isso se justifica no fato das questões apresentadas possuírem caráter mais técnico em relação aos primeiros questionários. Outro fator importante elencado é o fato das questões serem descritivas; haja vista que a proposta seria analisar as respostas dos estudantes de acordo com a concepção de Ausubel – aprendizagem significativa – optamos por utilizar este tipo de questão, pois permite uma gama maior de respostas (certas ou não) relacionadas a um

determinado fenômeno físico a ser difundido na realização deste Produto Educacional.

Considerações Finais

As concepções prévias relatadas pelos estudantes, bem como, suas respostas posteriores à realização de cada etapa desta sequência didática quando comparadas deverão remeter a uma mudança de paradigmas ou reformulação de conceitos.

Analisando nosso objetivo, que se evidencia a determinar a constante elástica de uma mola helicoidal e analisar a lei de conservação de energia aplicada a corpos deformáveis é válido relacionar conceitos físicos com os matemáticos (presentes nos cálculos, construção de gráficos, determinação de coeficientes angulares e lineares, entre outros). Tal interdisciplinaridade deverá ser realizada de modo a demonstrar aos alunos que as duas componentes curriculares se correlacionam a fim de explicar fisicamente e matematicamente um fenômeno físico.

O professor ao analisar as repostas dadas por seus alunos deve estar atento às respostas prévias e reformuladas pelos mesmos a fim de analisar mudanças de paradigmas, ou seja, transformar conhecimento de senso comum em científico. Nesta perspectiva, a aprendizagem significativa do estudante prevalece como norteadora da assimilação dos conceitos físicos apresentados na SD.

Referências

[Feyn08] FEYNMAN, Richard.(2008). *Lições de física de Feynman*. Trad. Adriana Válio Roque da Silva e Kaline Rabelo. Porto Alegre: Bookman.

[Fuk16] FUKUI, Ana. (org.) [et al.]. (2016). *Ser protagonista: física, 1º ano: ensino médio*. 3. ed. 1. São Paulo: SM.

[Guim14] GUIMARÃES, Osvaldo. PIQUEIRA, José R. CARRON, Wilson. (2014). *Física*. 1ª ed. 1. São Paulo: Ed. Ática.

[Hall11] HALLIDAY, D. RESNICK, R. KRANE, K.S. (2011) *Física*. 5ª ed. 1. Rio de Janeiro: LTC.

[Mer99] MERIAM, J. L. KRAIGE, L.G.(1999). *Mecânica – Dinâmica*. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC.

[MukFer18] MUKAI, H. FERNANDES, P. R. G. (2018). *Manual de Laboratório de Física I*. Disponível em: <http://site.dfi.uem.br/downloads-apostilas/> Acesso em 17 de novembro de 2018.

[Nus02] NUSSENZVEIG, H. Moysés. (2002). *Curso de Física Básica. 1 – Mecânica*. 4ª ed. São Paulo – SP: Edgar Blücher.

[ParFís08] PARANÁ, Secretaria do Estado da Educação. (2008). *Diretrizes Curriculares da Educação Básica – Física*. Curitiba – PR: Jam3 Comunicações.

[Zab98] ZABALA, Antoni. **A prática educativa: como ensinar**. Trad. Ernani F. da Rosa – Porto Alegre: ArtMed, 1998.<<https://novaescola.org.br/conteudo/262/david-ausubel-e-a-aprendizagem-significativa>>Acesso em 15 de novembro de 2018.

APÊNDICE A – Texto de Apoio

Neste apêndice está apresentado a teoria sobre os conceitos físicos envolvidos no PE. Consta da Lei de Hooke, aplicações, e a teoria para chegar na Lei de Conservação de Energia Mecânica e a aplicação da mesma.

A.1 Lei de Hooke

Nussenzveig (2002) afirma que Hooke enunciou a sua lei sob a forma de um anagrama. Esta forma comum de divulgação de resultados científicos no século XVII fora a maneira encontrada por Hooke para garantir a propriedade intelectual de sua obra, além de evitar que outros cientistas pudessem levar mais adiante suas ideias. Hooke enunciou o seguinte anagrama: “ceiinossttvi” que após dois anos fora decifrado pelo próprio Hooke como “*ut tensio, sic vis*”. Quando traduzido do latim, o termo significa “*como a deformação, assim a força*”. Pode-se concluir que o cientista britânico afirmava que a força é proporcional à deformação¹. [Nus02] Sendo o analisado por Hooke a deformação do tipo elástica².

Esse comportamento mecânico foi observado por Hooke em 1660 e publicado em 1676 quando analisava um sistema massa-mola na vertical, em que uma das extremidades da mola se encontrava fixa em um suporte e na outra acoplava as massas, semelhante ao ilustrado na Figura A.1 (a).

Portanto, ele observou o efeito da variação da força peso (força externa) que provocava uma variação no comprimento da mola e nesse surgia uma força na mola (\vec{F}_m) que atuava em sentido oposto à do movimento da massa suspensa, por isso denominada de força restauradora (Figura A.1 (a)). A constante de proporcionalidade entre essa força restauradora e o alongamento (Δy) ocorrido, é a denominada de constante elástica (k) da mola. Situação essa, válida também se o processo for de uma compressão na mola por uma força externa (Figura A.1 (b)).

¹ Ao aplicar uma força $F = P$ e esta deformar de Δy , se a força dobrar a deformação será de $2\Delta y$, se triplicar a força a deformação será de $3\Delta y$, e assim por diante. A deformação é uma função linear: $F \propto \Delta y$.

² Fisicamente há dois tipos de deformações: a plástica e a elástica. A plástica é o tipo de deformação permanente, que ao se tirar a força aplicada o material não retorna a sua forma e comprimento original. E, a do tipo elástica, ao retirar a força aplicada do material, este retorna ao seu tamanho e forma original.

Assim, a Lei de Hooke, em sua forma matemática atual, aplicada a casos unidimensionais, no caso na direção vertical³ (adotada como y), é dada por:

$$F_m = -k\Delta y \quad [A. 1]$$

O sinal negativo na Equação [A.1] é devido à força ser do tipo restauradora e, k a constante elástica depende da natureza do material da qual a mola é confeccionada, de seu diâmetro e comprimento em estado natural, bem como do diâmetro do fio. Sua unidade de medida no Sistema Internacional de Unidades (SI) corresponde a Newton por metro (N/m), e em CGS dada por dina⁴ por centímetro (dyn/cm). Cabe ressaltar que quanto maior o valor de k , maior será a rigidez da mola. [Nus02] E, a constante elástica é inversamente proporcional ao comprimento da mola. [MukFer18]

Observa-se⁵ na Figura A.1:

- Quando a mola é distendida (Figura A.1 (a)) a partir de $y = 0$, tem-se $\Delta y > 0$ e assim a força da mola é negativa, indicando que a força atuante pela mola age para a cima.

Quando a mola é comprimida (Figura A.1 (b)) a partir de $y = 0$, tem-se $\Delta y < 0$ e, conseqüentemente, a força da mola age para baixo e é positiva.

³ Adotando o sistema cartesiano, nesta parte de revisão adota-se o seguinte sistema de referência: x na horizontal apontada para a direita, y na vertical apontada para baixo e z perpendicular a x e y entrando no plano. Indicada no canto direito superior da Figura A.1.

⁴ $1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$. O termo dina e erg (unidade de energia em CGS) foi proposto em 1861 por Joseh David Everett, e posteriormente reutilizados em 1873, pelo *Committee of the British Association* no sistema CGS de unidades. Sua origem é do grego: $\deltaύναμις$ - dynamis: que significa força, poder. FONTE:< <https://pt.wikipedia.org/wiki/Dina>>

⁵ Texto adaptado da referência [Hall11], que apresenta o movimento do sistema massa-mola na horizontal.

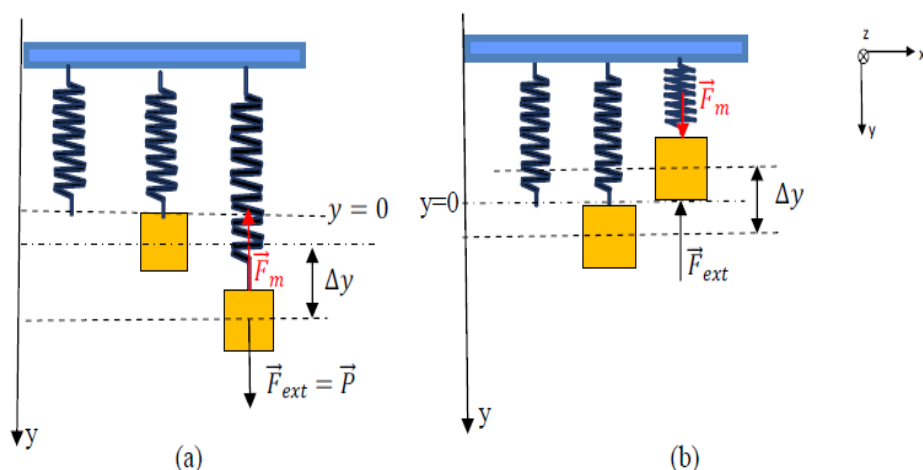


Figura A.1 - Desenho esquemático representando de forma unidimensional a força exercida pela mola, \vec{F}_m , quando esta é: (a) distendida e (b) comprimida, de uma quantidade Δy , por meio de uma força externa, \vec{F}_{ext} . Sendo $y = 0$ a mola em seu comprimento relaxado (estado natural). E, no canto direito o sistema de coordenadas cartesiano, indicando a direção e sentido adotado neste trabalho. FONTE: o autor.

Na próxima seção apresentam-se a teoria das situações que serão estudadas experimentalmente em sala de aula.

A.2 Explorando a Lei de Hooke

Nesta seção, analisar-se-á, a Lei de Hooke, para o sistema massa-mola, de um sistema em série e em paralelo. Posteriormente, obtêm-se a expressão da constante elástica k , via segunda lei de Newton: para o caso estático, em que se supôs que a massa é deslocada pela atuação somente da força peso, a partir de uma determinada posição em que se encontra no seu estado natural, e aferida o deslocamento por ela provocada; para o caso dinâmico, quando a massa oscila em torno do ponto de equilíbrio, em um movimento harmônico simples (MHS), sendo esta a forma mais desenvolvida nos textos como, por exemplo, as referências [MukFer⁶18] e [Per13].

⁶ A primeira versão redigida do texto pelos autores é do ano de 2005.

A.2.1 Associação de molas helicoidais e determinação da constante elástica k da mola

Nesta seção analisam-se como fica um sistema com molas associadas em série e em paralelo. As molas associadas serão dispostas considerando a direção vertical e sentido positivo para baixo, considerando um sistema de eixos cartesianos direção de y e sentido $+\hat{j}$. Os três eixos estão perpendiculares entre si, logo, a direção de x na horizontal – positivo da esquerda para a direita, e a direção z perpendicular ao plano, sentido positivo entrando no plano, conforme indicadas ao lado das figuras.

A.2.1.1 Associação de molas em série

Considere duas molas helicoidais (mola 1 e mola 2) com massas desprezíveis, de constantes elásticas k_1 e k_2 , respectivamente, associadas em série conforme apresentado na Figura A.2 (a). Na extremidade livre da mola 2, é conectada uma massa, que ao ser liberada irá se deslocar verticalmente sob a ação da força peso e uma força de mesma intensidade, direção e sentido, atuará na mola 2 e 1, Figura A.2 (b). Tal que, as elongações sofridas pelas molas na associação, utilizando a Equação [A.1], já considerando que⁷ $|\vec{F}_{el}| = |\vec{F}_{ext}| = |\vec{P}|$, bem como que as variações nas molas (a título de simplificação na notação): $\Delta y_1 = y_1$ e $\Delta y_2 = y_2$, são:

$$y_1 = \frac{P}{k_1}, \quad [\text{A. 2 a}]$$

$$y_2 = \frac{P}{k_2}. \quad [\text{A. 2 b}]$$

Ao associarmos molas em série, a força ($\vec{F}_{ext} = \vec{P}$) que atua sobre cada uma das molas acopladas, bem como as respectivas distensões sofridas, y_1 e y_2 , são

⁷Esse sistema pode ser visto na simulação disponível em: https://phet.colorado.edu/sims/html/hookes-law/latest/hookes-law_pt_BR.html, só muda a direção do deslocamento, considerado na horizontal.

independentes. O conjunto de molas apresentada na Figura A.2 (c) possui uma distensão $y_s = y_1 + y_2$ (sendo o s de série).

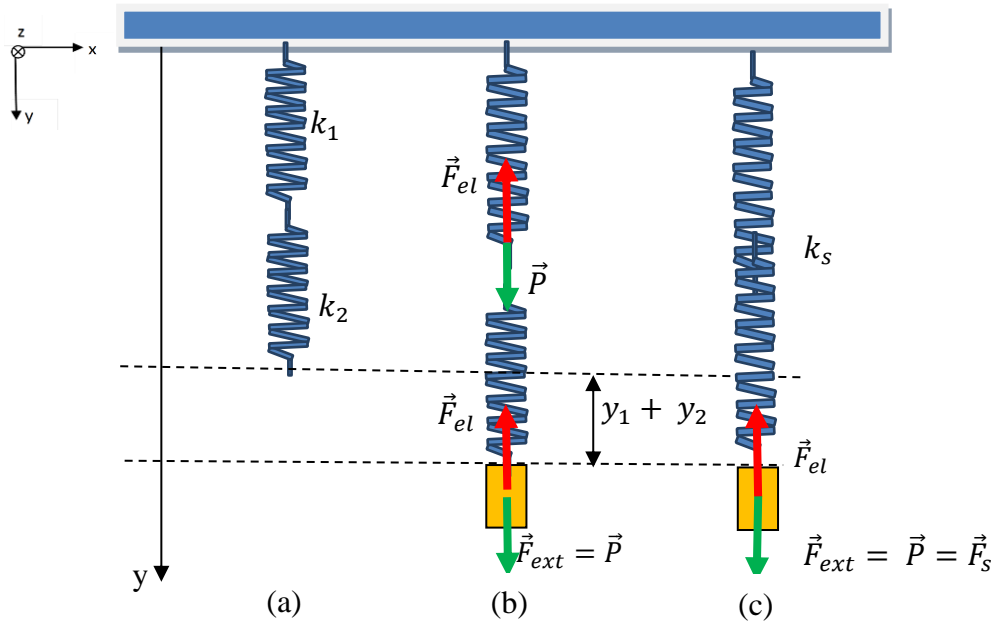


Figura A.2 - Ilustração de duas molas de constantes k_1 e k_2 , associadas em série: (a) sem massa suspensa na extremidade livre da associação; (b) sistema em equilíbrio estático com uma massa na extremidade livre da mola; (c) \vec{F}_{ext} = força externa; \vec{P} = força peso; \vec{F}_{el} = força elástica; \vec{F}_s = força na série; k_s = constante elástica equivalente da associação em série; y_1 e y_2 são as elongações das respectivas molas. O sistema de referência está indicado no canto superior esquerdo da figura. As massas das molas são desprezíveis em relação à massa suspensa. FONTE: o autor.

Utilizando o fato de que o sistema está em equilíbrio estático, isto é: $|\vec{F}_{el}| = |\vec{F}_{ext}| = |\vec{P}|$, podemos escrever:

$$y_s = y_1 + y_2 = \frac{P}{k_s}, \quad [\text{A. 3}]$$

em que k_s é a constante elástica equivalente das molas associadas em série.

Utilizando as Equações [A.2 a] e [A.2 b] na Equação [A.3], obtemos o seguinte:

$$\frac{P}{k_1} + \frac{P}{k_2} = \frac{P}{k_s},$$

$$\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{1}{k_s}. \quad [\text{A. 4}]$$

Assim, utilizando a Equação [A.4] podemos determinar a constante elástica da associação em série de duas molas, conhecidas as constantes elásticas de cada mola individualmente:

$$k_s = k_{eq.} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}. \quad [A. 5]$$

Generalizando para n molas associadas em série, k_s pode ser obtida pela Equação [A.5].

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}. \quad [A. 6]$$

A.2.1.2 Associação de molas em paralelo

Quando duas ou mais molas helicoidais, de mesmo comprimento, estão associadas em paralelo, estas dividem a força aplicada de forma igual. Para isso, considera-se que a força \vec{F} atua no ponto médio do suporte que as une, e por consequência uma força $\vec{F} = \sum_{i=1}^n \frac{\vec{F}_i}{n}$ sendo i o número da mola e n o número de molas, atuará na extremidade de cada mola e as distenderá pela mesma quantidade y .

Para analisar essa situação, considere um sistema com duas molas, de constantes k_1 e k_2 , e mesmo comprimento, associadas em paralelo penduradas verticalmente em um suporte. Na outra extremidade das molas há uma haste rígida que as mantém acopladas (Figura A.3). Esse será o estado inicial do sistema (Figura A.3 (a)).

Após atuar a força externa \vec{F}_{ext} na haste rígida, conectando uma massa m , no ponto médio entre as duas molas, Figura A.3 (b), há um deslocamento de quantidade y , que é a distensão sofrida pelas molas. Como a força é distribuída de

forma igual entre elas⁸, estas foram consideradas como \vec{F}_1 (força na mola 1) e \vec{F}_2 (força na mola 2).

Na Figura A.3 (c) apresenta-se o sistema equivalente da conexão das duas molas em paralelo, k_p , tal que a força aplicada \vec{F} e a força elástica \vec{F}_{el} terão a mesma magnitude em que k_p é a constante elástica da associação das molas em paralelo:

$$F = F_1 + F_2 = k_p y . \quad [A. 7]$$

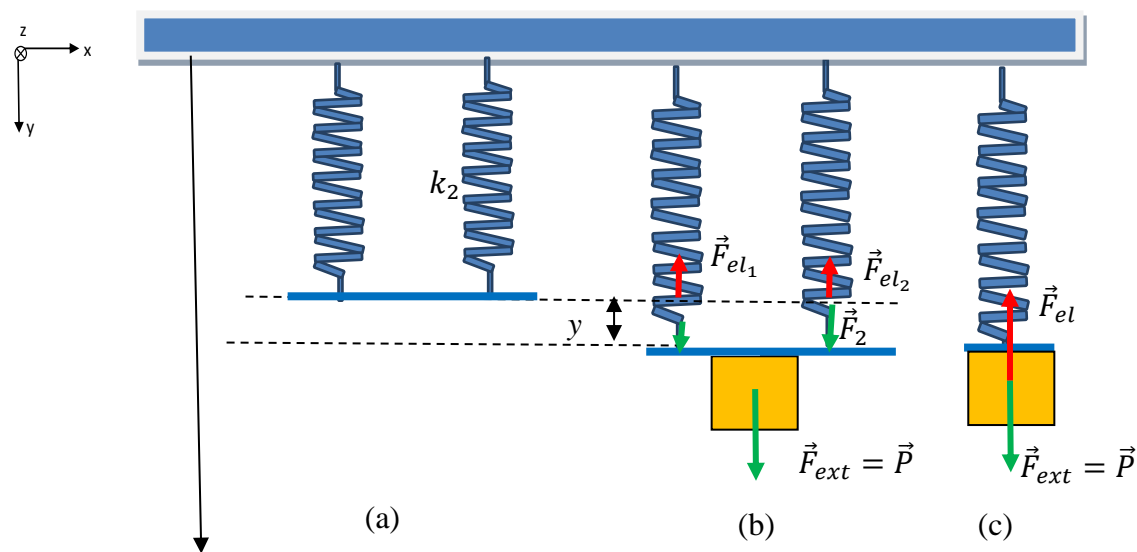


Figura A.3- Figura esquemática indicando: (a) uma associação de duas molas em paralelo com constantes elásticas k_1 e k_2 ; (b) \vec{F}_{ext} é a força externa aplicada às molas em paralelo, dada por \vec{P} = força peso; k_p = constante elástica equivalente das molas associadas em paralelo; \vec{F}_{el1} e \vec{F}_{el2} são as forças elásticas em cada uma das molas; (c) o sistema equivalente da associação em paralelo. As massas das molas e da haste rígida são desprezíveis em relação à massa suspensa. FONTE: o autor.

Considerando que cada força aplicada é igual a força elástica oposta a mesma e dada pela Equação [A.1] em que $\Delta y = y$, podemos escrever a Equação [A.7] como: $k_1 y + k_2 y = (k_1 + k_2) y = k_p y$, logo:

$$k_p = k_1 + k_2 . \quad [A. 8]$$

⁸Situação que pode ser observada por meio de simulação no site: https://phet.colorado.edu/sims/html/hooks-law/latest/hooks-law_pt_BR.html

Portanto, a constante elástica equivalente no caso de molas associadas em paralelo é a soma das constantes elásticas de cada mola individualmente.

Uma relação geral para um conjunto de n molas associadas em paralelo é expressa matematicamente por [A.9]:

$$k_p = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n = \sum_{i=1}^n k_i. \quad [\text{A. 9}]$$

Na próxima seção serão apresentadas duas situações a trabalhar as configurações em série e/ou em paralelo, que serão o caso em que o deslocamento é feito de forma constante, e outra oscilando em torno de um ponto de equilíbrio, denominados de caso estático e dinâmico respectivamente. Para a dedução das equações será considerada o caso de uma mola na vertical, variando as massas que serão suspensas.

A.2.2 Determinação da constante elástica k da mola para os métodos: estático e dinâmico – via segunda Lei de Newton

Na Equação [A.1], a Lei de Hooke em sua forma matemática atual é atribuída a corpos deformáveis elasticamente, tais como, elásticos e molas helicoidais. Consideremos a seguir, a situação para molas helicoidais, em que será determinada a expressão da constante elástica para os métodos: estático (sem oscilação, aceleração nula, $a = 0$) e dinâmico (com oscilação em Movimento Harmônico Simples – MHS, aceleração não nula, $a \neq 0$), obtidas da forma tradicional partindo do princípio da dinâmica (a segunda Lei de Newton, para quando a massa em movimento se mantém constante).

A.2.2.1 Determinação da constante elástica k da mola para o método estático

O sistema massa-mola em equilíbrio, bem como, as forças atuantes no mesmo, são os representados na Figura A.1. Adotando a situação apresentada na Figura A.1 (a), um deslocamento unidimensional, na vertical, em que a força externa

é a força peso. Aplicando a segunda lei de Newton, $\sum F_y = m a_y$, para o caso em que a massa do corpo se mantém constante, e considerando a direção do deslocamento sendo Δy , temos que:

$$P - F_m = m a_y. \quad [\text{A. 10}]$$

Substituindo, a força peso por $P = mg$, em que, g é a aceleração gravitacional da Terra⁹[Mer99] e a força da mola $k \Delta y$, e ainda considerando a aceleração nula (estático), a Equação [A.10] torna-se:

$$mg - k\Delta y = 0. \quad [\text{A. 11}]$$

Isolando a constante elástica na Equação [1.11] de modo a obtermos uma equação que nos permite calcular a constante elástica pelo método estático, $k_{estático}$:

$$k_{estático} = \frac{mg}{\Delta y}. \quad [\text{A. 12}]$$

Como já disposto neste capítulo, a constante k possui como unidade de medida no SI, N/m (Newton por metro) e que em Em CGS, dyn/cm (dinas/centímetro), em que $1N = 10^5 \text{ dyn}$.

O gráfico que representa a Equação [A.12] é o da Figura A.4, Sendo este um esboço de um gráfico do módulo da força externa ($|\vec{F}_{ext}| = |\vec{P}|$) *versus* o módulo do deslocamento ($|\Delta\vec{y}|$), no caso considerando uma distensão da mola como apresentado na Figura A.1 (a), e representado na Figura A.4; nesse caso, considerando massas sendo acrescidas¹⁰ e a cada uma medindo o deslocamento causado pela força peso ($\vec{P} = m\vec{g}$), atuante na mola, obtém-se um gráfico linear. Cada cor equivale a uma mola de mesmo material e comprimento diferente, ou material diferente e mola de mesmo comprimento. Tal que: $k_1 > k_2 > k_3$. Lembrando

⁹O valor nominal "médio" na superfície da Terra, conhecida como gravidade padrão é, por definição, 9,80665 m/s².

¹⁰Isso pode ser verificado experimentalmente, utilizando espiral de encadernação que tenha certa elasticidade, e massas de valores conhecidos (tal que não deforme a mola de forma permanente), feitas de qualquer material, que possam ser acrescidas na extremidade da mola. Um suporte e uma régua para realizar a leitura do deslocamento.

que a força da mola possui um sinal negativo (resistente à distensão), oposta a força peso.

Ainda na Figura A.4, leva-se em consideração a força peso inicial referente à massa da mola ou qualquer outra massa suspensa junto à mola na posição inicial como a haste rígida na Figura A.3 (a); que normalmente convencionam-se como desprezíveis quando comparadas as massas que serão adicionadas a ela e que provocarão o deslocamento Δy a partir de um ponto inicial y_0 . Esse valor se refere ao coeficiente linear ($F_0 = P_0$) da reta, e normalmente surge ao se realizar o ajuste da reta, e não na relação de proporcionalidade de interpretação direta do gráfico $F \propto \Delta y^n$, no caso $n = 1$ (comportamento linear) e k a constante de proporcionalidade k (no caso a constante elástica da mola): $F = k\Delta y$. Visto que nessa equação supõe-se que $F_0 = P_0 = 0$ no ponto inicial $y_0 = 0$.

A constante de proporcionalidade é dada pelo coeficiente angular da reta, obtida pela inclinação dessa reta.

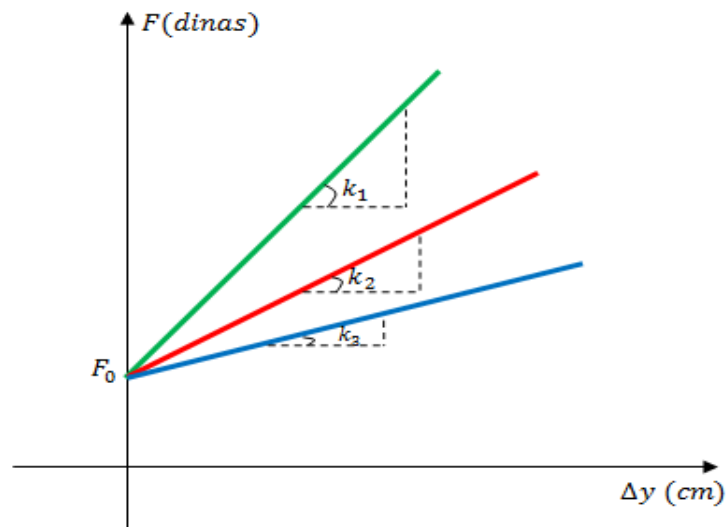


Figura A.4 - Esboço de um gráfico representando o comportamento linear do módulo da Força ($F = P = mg$) versus módulo do deslocamento (Δy), para 3 molas com características diferentes: comprimento ou material; O coeficiente angular da reta $F_i = F_0 + k_i\Delta y$, sendo $i = 1, 2, 3$, é a constante elástica da respectiva mola e o coeficiente linear, F_0 , dessa reta é a força peso inicial que atua na mola, inclusive sua massa caso não seja desprezível. FONTE: o autor.

Vejamos na sequência, como fica a equação da constante elástica para um processo dinâmico - mola oscilando na vertical em torno de um ponto de equilíbrio.

A.2.2.2 Determinação da constante elástica k da mola pelo método dinâmico

Quando o sistema massa-mola não está em equilíbrio estático, também é possível determinar a constante elástica k da mola. Desprezando as forças dissipativas¹¹, nesse caso, há uma aceleração resultante diferente de zero na Equação [A.10]:

$$P - F_m = ma. \quad [A.13]$$

Considerando, $a_y = a$, a aceleração resultante da massa m acoplada à extremidade livre da mola. Nesse caso, a massa irá oscilar em torno do ponto de equilíbrio, $y = y_0 = 0$, (Figura A.5).

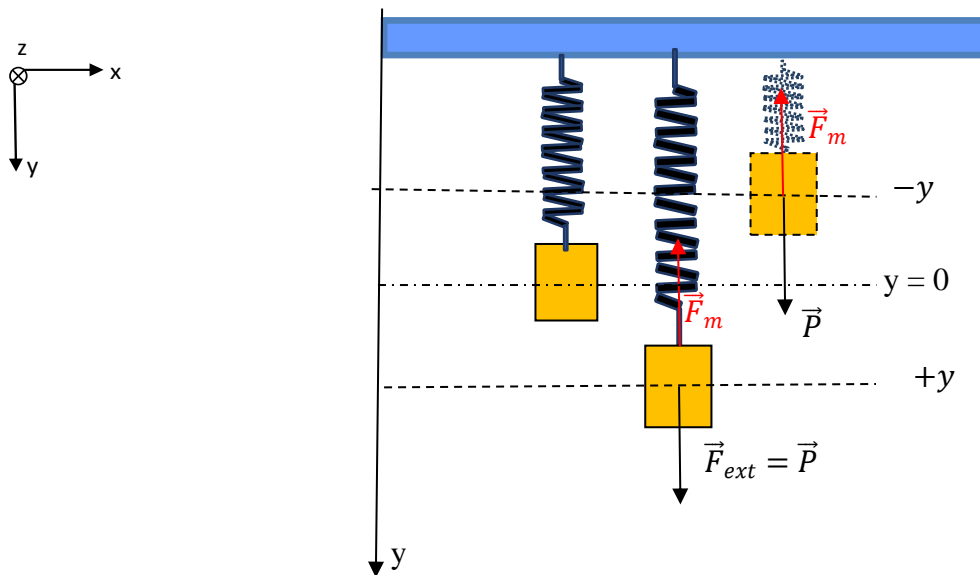


Figura A.5 - Figura esquemática indicando um sistema massa-mola oscilando em torno do ponto de equilíbrio ($y = 0$). A mola possui constante k , a força externa (no caso a força peso \vec{P} do corpo de massa m) atua alongando de uma quantidade y e retorna comprimindo em direção oposta até $-y$. Fonte: figura adaptada da referência. [Hall 11].

Sendo, a amplitude máxima de oscilação de $+y$ a $-y$. Observando que o sentido da força da mola é sempre único, fazendo com que o corpo oscile na direção

¹¹ Como será visto posteriormente (seção A.7), são forças cuja energia se dissipa ao realizar determinado processo mecânico. O exemplo mais comum é a força de atrito entre um corpo e uma superfície, a energia se dissipa em termos de aquecimento (energia térmica).

vertical, subindo e descendo ou descendo e subindo, dependendo do ponto de origem do movimento.

Experimentalmente, caso fosse considerado um longo tempo, ter-se-ia o que se chama de Movimento Harmônico Amortecido (MHA) devido a influência da resistência do ar¹², em que a amplitude vai diminuindo até parar. Ambos os casos podem ser visto em um Pêndulo Simples, por exemplo, no capítulo 09 da referência [MukFer, 2018].

Mas, se considerarmos o tempo¹³ entre 3 a 10 oscilações completas (T-período), dependendo da mola e do sistema, pode-se desprezar a força de resistência da massa com o ar e esse tipo de oscilação é conhecido como Movimento Harmônico Simples (MHS).

Além disso, o movimento, posição em função do tempo em um gráfico, é representado por uma função seno ou cosseno da frequência de oscilação no tempo, como será apresentado a seguir.

A Equação [A.13] torna-se:

$$mg - k(\Delta y - y) = m \frac{d(\Delta y - y)}{dt}. \quad [A.14]$$

Ao considerarmos que $mg - k\Delta y = 0$, pois é a origem do eixo onde ocorre equilíbrio estático em que: $\frac{d(\Delta y)}{dt}=0$, obtemos a seguinte equação matemática em sua forma derivada [A.15]:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{k}{m}y = 0. \quad [A.15]$$

A Equação [A.15] é uma equação diferencial de segunda ordem homogênea (EDO), com solução geral expressa por:

$$y(t) = y_{\max} e^{i(\omega t + \varphi)}, \quad [A.16]$$

¹²Um tipo de força de atrito do ar com o objeto. No MHA, o resultado de um gráfico da amplitude com relação ao tempo é uma função exponencial decrescente no tempo devido ao amortecimento. Uma simulação deste movimento pode ser visto na referência: <<https://giphy.com/gifs/2A8saq6q3h5mVoSbGp>>. Acesso em 23/06/2019.

¹³ Repetir o processo e fazer uma média aritmética simples para diminuir a imprecisão na medida.

em que: ω é a frequência angular característica da mola, $y_{m\acute{a}x}$ a amplitude de oscilação e φ é uma fase. A parte real da Equação [A.16] é expressa por¹⁴[Hall11]:

$$y(t) = y_{m\acute{a}x} \cos(\omega t + \varphi), \quad [\text{A.17}]$$

sendo essa a solução da Equação [A.15]. Derivando duas vezes a Equação [A.17] em relação ao tempo, temos: $\frac{d^2y}{dt^2} = -y_{m\acute{a}x}\omega^2 \cos(\omega t + \varphi)$; e, substituindo na Equação [A.15] em seu primeiro termo junto com a Equação [A.17] no segundo termo, obtém-se¹⁵:

$$-y_{m\acute{a}x}\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) + \frac{k}{m}y_{m\acute{a}x} \cos(\omega t + \varphi) = 0. \quad [\text{A.18}]$$

Simplificando os termos iguais na Equação [A.18], tem-se que:

$$\omega^2 = \frac{k}{m}. \quad [\text{A.19}]$$

Como já informado, T é o período de oscilação do sistema, isto é, o intervalo necessário para que o sistema realize um ciclo completo do seu movimento (que neste caso será o movimento unicamente na vertical¹⁶, de descer de $(-y)$ até (y) e subir de volta até $(-y)$ e considerando matematicamente que a frequência angular é a relação de 2π (percurso da massa em 1 T) pelo período ($\omega = \frac{2\pi}{T}$), obtém-se a Equação [A.20], que relaciona o período T e a constante elástica, k , de uma mola helicoidal utilizando o método dinâmico (oscilatório). [MukFer18] e [Per13].

$$k_{\text{din\acute{a}mico}} = \frac{4\pi^2 m}{T^2}. \quad [\text{A.20}]$$

¹⁴ $e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \text{sen}(\omega t)$.

¹⁵A função $y(t) = A \cos(\omega t + \theta_0)$ é uma solução da equação diferencial ordinária (EDO) $\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{ky}{m} = 0$;

¹⁶Sem que haja a formação de movimento pendular.

Um sistema em que se desprezam as forças dissipativas¹⁷, e oscila em torno de um ponto de equilíbrio é o denominado de movimento harmônico simples (MHS), conforme já discutido nesta subseção A.2.2.2.

A seguir, entra-se nos conceitos referentes a energia.

A.3 Constante Elástica via Lei de Conservação da Energia Mecânica

Primeiramente para obtermos a Lei de Conservação de Energia Mecânica, e entre os tópicos estão os que serão utilizados para obter as mesmas expressões das constantes elásticas para o caso estático (Eq. [A.12]) e dinâmico (Eq. [A.20]) por meio dessa Lei.

O conceito de energia, primeiramente está ligado ao de trabalho, visto que de forma simplificada: *Energia é a habilidade de determinado corpo realizar trabalho, e trabalho é a energia transferida por uma determinada força*. Como citado por Halliday:

Trabalho (W) é a energia transferida para um objeto ou de um objeto por meio de uma força que age sobre o objeto. Quando a energia é transferida para o objeto, o trabalho é positivo; quando a energia é transferida do objeto, o trabalho é negativo. (HALLIDAY, *et al* 2016. p. 342). [Hall16]

Como toda força pode realizar trabalho, vejamos como fica o trabalho realizado pela força elástica.

Considera-se a partir deste ponto o termo força elástica entre elas está contida a força da mola.

A.3.1 Trabalho realizado pela força elástica

O trabalho (W) realizado por uma força \vec{F} para deslocar um corpo de um ponto inicial i a outro final f , é dado por¹⁸:

$$W_{i \rightarrow f} = \int_i^f \vec{F} \cdot d\vec{l}. \quad [\text{A. 21}]$$

¹⁷ Neste caso a força dissipativa é força de atrito do corpo com o ar.

¹⁸ Em que: $\vec{F} = F_x \hat{i} + F_y \hat{j} + F_z \hat{k}$ e $\vec{l} = x \hat{i} + y \hat{j} + z \hat{k}$.

Observando que, o trabalho depende da força que realiza o deslocamento e que a força, ou a componente da mesma, deve estar na mesma direção do deslocamento. Bem como, o trabalho total em uma única direção é a soma de todos os trabalhos que fazem o corpo mover-se na direção do deslocamento.

Adotando o sistema unidimensional, em que o deslocamento ocorre na vertical (y), a Equação [A.21] fica escrita na forma¹⁹:

$$W_{i \rightarrow f} = \int_i^f F_y dy \cos \theta, \quad [\text{A. 22}]$$

em que θ é o ângulo entre a força e o deslocamento. A unidade de trabalho é a mesma de energia, Joules ($J = \text{Nm}$) no SI.

No caso de nosso sistema, (Figura A.1 (a)), a força e o deslocamento estão na mesma direção e sentidos opostos²⁰, visto que é a força exercida pela mola é no sentido para cima e o deslocamento é para baixo, e a Equação [A.22] fica escrita na forma:

$$W_{i \rightarrow f} = - \int_i^f F_m dy. \quad [\text{A. 23}]$$

Assim, o trabalho realizado pela força restauradora, \vec{F}_m , quando essa é distendida de sua posição inicial y_0 até a posição final y_1 pela atuação de força externa \vec{F} , é dado por:

$$W_m = - \int_{y_0}^{y_1} F_m dy = - \int_{y_0}^{y_1} (ky) dy = - \frac{1}{2} k (y_1^2 - y_0^2). \quad [\text{A. 24}]$$

Nota-se pela Equação [A.24] que o trabalho realizado pela mola é negativo visto que: $y_1 > y_0$. Esse fato é justificável visto que o sentido de \vec{F}_m ser oposto ao

¹⁹ Utilizando a definição de produto escalar: $\vec{A} \cdot \vec{B} = A B \cos \theta$, sendo A e B o módulo dos vetores \vec{A} e \vec{B} , e θ o ângulo formado entre eles.

²⁰ $\cos 180^\circ = -1$.

deslocamento de modo que, o trabalho realizado pela mola W_m também seja negativo.

Quando a força externa agir de modo a comprimir a mola conforme apresentado na Figura A.1 (b), ambos y_0 e y_1 são negativos, mas $|y_1| > |y_0|$, e a força da mola continua oposta ao sentido do deslocamento. Logo o trabalho continua sendo negativo.

Desta forma, não importa se alongada ou comprimida, o trabalho para uma variação de y_0 a y_1 , será negativo. Fato este também que pode ser visto na Equação [A.24], em que cada extremidade será elevada ao quadrado, como resultado da integral da força elástica (força da mola), portanto não importa o sinal de y_0 e y_1 .

O que influencia no sinal do trabalho realizado pela mola, é o sentido da força aplicada em relação ao sentido da deformação:

- $|y_1| > |y_0|$, distensão/alongada, o $W < 0$ (negativo);
- $|y_1| < |y_0|$, compressão, o $W > 0$ (positivo).

É possível realizarmos uma interpretação geométrica, como normalmente é utilizada no ensino médio²¹, acerca do cálculo do trabalho realizado pela mola conforme apresentamos na Figura A.6. Isto é possível visto que o trabalho é representado pela área acima ou abaixo da curva de um gráfico da força (F) pelo deslocamento (y). Na Figura A.6 podemos observar que a força exercida pela mola é linear, dada pela reta decrescente em um processo de alongação da mola, quando este varia de uma posição y_0 a y_1 . [Nuss02]

Calculando a área pintada na Figura A.6, que é dada pela área trapézio:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{h(B + b)}{2} = (y_1 - y_0) \frac{1}{2} (-ky_0 - ky_1) \\
 &= -\frac{k}{2} (y_1 - y_0)(y_1 + y_0) \\
 A &= -\frac{1}{2} k(y_1^2 - y_0^2) = W_{y_0 \rightarrow y_1} \quad [A. 25]
 \end{aligned}$$

²¹Visto que a força não é constante, essa varia com relação ao deslocamento, e, portanto não se utiliza diretamente a expressão do produto da força e do deslocamento, e como normalmente ainda não estudaram sobre integral, utiliza-se a forma geométrica para se calcular.

Como já mencionado anteriormente, o trabalho realizado pela força sobre a mola é negativo quando $y_0^2 < y_1^2$ a mola sofre uma distensão. Em contrapartida, o trabalho será positivo quando $y_0^2 > y_1^2$ a mola for comprimida.

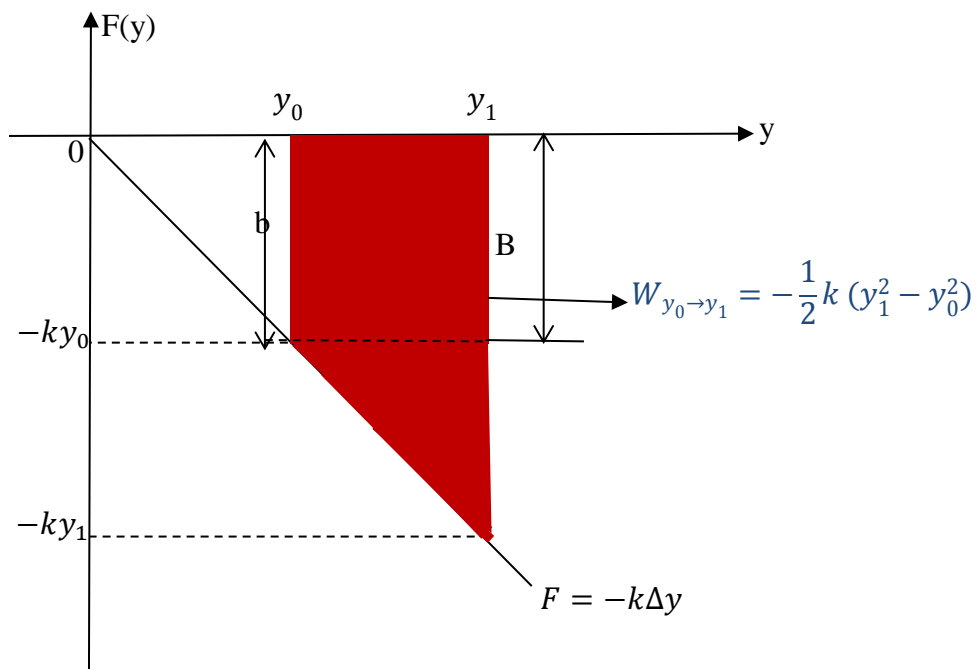


Figura A.6 - Representação esquemática da força exercida pela mola em função da sua distensão. Nota-se que o trabalho realizado por essa força é representado pela área pintada na figura. FONTE: figura adaptada da referência Nussenzveig (2002).

Assim, vemos que o trabalho realizado pela força elástica (força da mola) depende apenas da posição inicial e final. As forças que possuem essa característica são denominadas de forças conservativas, que é o assunto da próxima seção.

A.3.2 Forças Conservativas

Definimos como força conservativa aquela que depende apenas da posição inicial (i) e final (f), ou seja, não depende do “caminho” realizado. Um exemplo está representado na Figura A.7, adaptado da referência [Tor13].

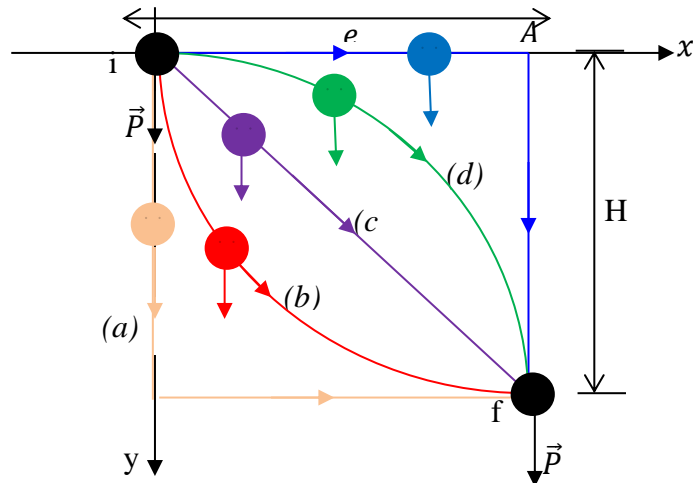


Figura A.7 - Desenho esquemático ilustrando uma massa m que sai do ponto i até f , e várias das trajetórias que o mesmo possa percorrer. FONTE: Figura adaptada da referência [Tor13]

O trabalho realizado pela força peso nas trajetórias (a), (b), (c), (d) e (e), supondo $H = A = 4$ m, e considerando a Equação [A.22] são dadas por:

- Trajeto (a): $W_{i \rightarrow f} = F d \cos \theta = mg (4) \cos 0^\circ + mg (4) \cos 90^\circ = 4 mg + 0 = 4mg$;
- Trajeto (b): $W_{i \rightarrow f} = \int_i^f mg dy = mgH = 4 mg$;
- Trajeto (c): $W_{i \rightarrow f} = F d \cos \theta = mg (4) \cos \theta = 2\sqrt{2} mg \cos 45^\circ = 4 mg$;
- Trajeto (d): $W_{i \rightarrow f} = \int_i^f mg dy = mgH = 4 mg$;
- Trajeto (e): $W_{i \rightarrow f} = F d \cos \theta = mg (4) \cos 90^\circ + mg (4) \cos 0^\circ = 4 mg$.

Logo, o trabalho realizado pela força peso para ir do ponto inicial ao final, independe da trajetória, e será sempre $W_{i \rightarrow f} = mgH$, conforme o exemplo que considera $H = 4$.

A força elástica (como a força da mola) é outra força do tipo conservativa. Em contrapartida, a força de atrito é um exemplo de força não conservativa, visto que essa dissipa, por exemplo, em forma de energia térmica. [Hall11]

Estas definições são importantes, uma vez que podemos observar o trabalho realizado por forças de diferentes naturezas sobre um determinado corpo, à medida que esta se desloca ao longo de uma trajetória e retorna ao ponto de origem.

Outra condição sobre o trabalho e as forças conservativas, é o trabalho total realizado por uma força em um percurso fechado ser nulo. No caso do exemplo da Figura 1.8, temos que por qualquer uma das trajetórias, o trabalho realizado pela força peso para ir de i ao ponto f é igual a $W_{i \rightarrow f} = mgH$, e para ir do ponto f para o ponto i , é dado por $W_{f \rightarrow i} = -m g H$, tal que o trabalho total será igual a zero.

Vejamos mais dois exemplos (Figura A.8), sendo um deles:

- (a) o sistema massa-mola relacionada à força elástica e
- (b) o pêndulo simples, outra atuação somente da força gravitacional.

Em ambas as situações um corpo de massa m , retorna ao seu ponto inicial após um deslocamento $y = \pm d$ e $y = \pm A$ respectivamente, e neste caso temos um trabalho total nulo. Isso desprezando o atrito com o ar durante o tempo de observação. Após determinado momento começa a atuar a força de atrito e o trabalho total é não nulo.

Apresentando cada caso detalhadamente:

• **Sistema massa-mola**

Considerando o sistema apresentado na Figura A.8 (a): Uma mola helicoidal comprimida ou distendida exerce uma força \vec{F}_m orientada na direção e sentido que faz regressar a mola à sua forma inicial. E, como apresentado, o módulo da força exercida pela mola (Força Elástica, no caso chamamos de Força da mola) é diretamente proporcional à distensão/compressão da mola.

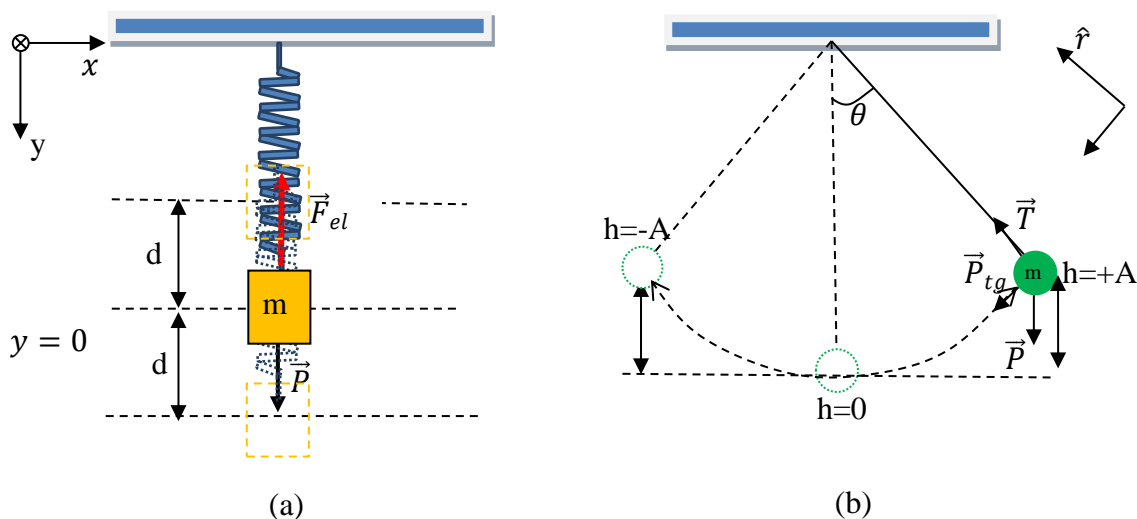


Figura A.8 - Figuras esquemáticas (a) sistema massa mola e (b) pêndulo simples. Em ambos os casos oscilam em relação ao seu ponto de equilíbrio ($y=0$ e $h=0$), de $y = \pm d$ e $y =$

$\pm A$) respectivamente para cada caso). No caso (a) por meio de duas forças: força peso (\vec{P}) do bloco de massa m e da força elástica/força da mola ($\vec{F}_{el} = \vec{F}_m$) e em (b) somente pela atuação da componente tangencial (\vec{P}_{tg}) da força peso da esfera de massa m , após esta ser liberada de uma altura h . FONTE: o autor.

Analisando a Figura A.8 (a) com mais detalhes (Figura A.9), iniciando com uma compressão²², tem-se (utilizando a Equação [A.21]):

- Retira-se o agente externo ($t = 0,0$ s; $v_0 = 0,0$ cm/s) fazendo com que a mola comece a realizar trabalho sobre o bloco. Este se deslocando passando por $y = 0$;

$$W_{-d \rightarrow 0} = \int_{-d}^0 F_m dy = \int_{-d}^0 (ky) dy = +\frac{1}{2} k (d^2); \quad [A. 26]$$

- O bloco continua movimentando para baixo sob ação da força peso e da mola que a empurra devido à compressão sofrida inicialmente, até atingir a posição $y = +d$, posição máxima ($v = 0$); muda o sentido do deslocamento para cima:

$$W_{0 \rightarrow +d} = \int_0^{+d} F_m dy = \int_0^{+d} (-ky) dy = -\frac{1}{2} k (d^2); \quad [A. 27]$$

- A força exercida pela mola muda de sentido, puxando o corpo para cima, oposta a força peso e, passando pela posição de equilíbrio ($y = 0$).

$$W_{+d \rightarrow 0} = \int_{+d}^0 F_m dy = \int_{+d}^0 (ky) dy = +\frac{1}{2} k (d^2); \quad [A. 28]$$

- E continua o movimento até retornar à posição $y = -d$.

²² Observando o perfil da Figura A.9, em um período (T), representamos o processo de ida e volta da massa, é uma função cosseno ($\cos \omega t$), como informada na solução (Equação [1.20]) do caso dinâmico da constante elástica.

$$W_{0 \rightarrow -d} = \int_0^{-d} F_m dy = \int_0^{-d} (ky) dy = -\frac{1}{2} k (d^2). \quad [\text{A. 29}]$$

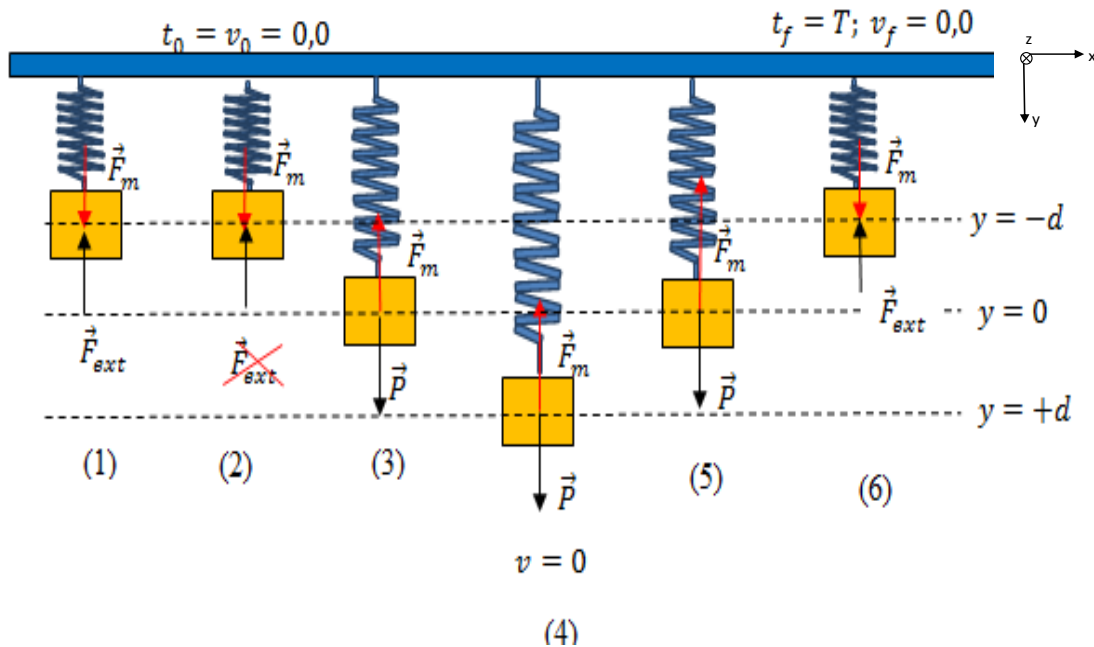


Figura A.9 - Figura esquemática indicando as etapas de um ciclo completo, do processo de ida e volta da oscilação do sistema massa-mola: (1) atuação de uma força externa (\vec{F}_{ext}) com oposição da força da mola (\vec{F}_m); (2) retira-se a força externa (\vec{F}_{ext}); (3) a mola se desloca para baixo pela atuação da força peso (\vec{P}) e da força da mola (\vec{F}_m), (4) atinge a posição $+d$ (amplitude máxima) e inicia seu processo de retorno (5) em que a força da mola e o deslocamento mudam de sentido, passa pelo ponto de equilíbrio, até atingir (6) a posição inicial ($y = -d$), completando 1 período (T). FONTE: figura adaptada da referência [Hall11].

O bloco movimentando-se de $y = -d$ até $y = +d$ em movimento oscilatório e o trabalho da mola para voltar até seu ponto de partida é representado, matematicamente, por:

$$W_{-d \rightarrow 0} + W_{0 \rightarrow d} + W_{d \rightarrow 0} + W_{0 \rightarrow -d} = W_T = 0. \quad [\text{A. 30}]$$

Portanto, quando o bloco retorna a sua posição de origem, somando-se as quatro contribuições, no ciclo completo, o trabalho total realizado pela mola será igual a 0 (zero). Esta é uma das características que indica que a força elástica é uma força conservativa.

Outro processo semelhante é o de um pêndulo simples (Figura A.8(b)), que envolve somente a força gravitacional.

- **Pêndulo Simples**

O trabalho realizado pela força peso, para levar a massa de sua posição inicial até a final, é nula (completando 1 T); observando na Figura 1.8 (b), tem-se uma massa que oscila do ponto $+A$ até o ponto $-A$, passando pelo ponto de equilíbrio 0 . Sua trajetória é um arco de curva. Desprezando a massa do fio, temos que a atuação da componente tangencial da força peso (\vec{P}): $P_{tg} = mg \sen\theta$, ao liberar a massa está a favor do deslocamento. O trabalho realizado por essa componente da força peso é representado por:

$$W = +(mg \sen \theta)A. \quad [A.31]$$

Ao atingir a amplitude máxima $-A$, irá retornar em sentido oposto:

$$W = -(mg \sen \theta)A. \quad [A.32]$$

Portanto, o trabalho total realizado pela força gravitacional sobre a massa em seu movimento de ida e volta é nulo (1 T), ou seja, somando as Equações [A.31] e [A.32] temos: $W_T = 0$.

De forma geral, nominamos **trabalho motor**, quando $W > 0$ e de **trabalho resistente** quando $W < 0$.

Assim, vimos que o trabalho total realizado por uma força conservativa é nula, bem como independe da trajetória (caminho percorrido em um percurso fechado) de ir de sua posição inicial até sua posição final e retornar a sua posição inicial, dependendo somente da posição inicial e final. Vejamos o que ocorre para uma força não conservativa, em termos do trabalho total realizado por esta força ser ou não nulo.

A.3.3 Força de atrito, uma força não conservativa

O físico francês Charles Augustin Coulomb (1736-1806) determinou experimentalmente as leis do atrito entre as superfícies de dois corpos, chegando à conclusão de que a intensidade da força de atrito estático máxima $\vec{f}_{a\text{máx}}$ é diretamente proporcional à intensidade da força normal \vec{N} entre os corpos em contato [Guim14]. Matematicamente, podemos escrever tal definição conforme [A.33]:

$$\vec{f}_{a\text{máx}} = \mu \vec{N}. \quad [\text{A. 33}]$$

Na Equação [A.33], μ a constante de proporcionalidade entre as grandezas envolvidas, é chamada de coeficiente de atrito estático ou cinético entre as superfícies. A força de atrito²³ atua sempre em sentido oposto ao movimento de um corpo²⁴, assim, o trabalho realizado por ela é sempre negativo ($W < 0$).

Na Figura A.10 é possível identificar a atuação da força de atrito (\vec{f}_a) – além de outras forças já conhecidas, tais como, a força normal \vec{N} , a força peso \vec{P} e a força \vec{F} que age no intuito de fazer com que o bloco apresentado na figura adquira movimento. É válido observar que \vec{F} e \vec{f}_a possuem sentidos opostos e, conseqüentemente, tem-se um trabalho total realizado pela força de atrito não nulo.

Podemos, ainda, afirmar que o trabalho realizado pela força de atrito para ir de A até B , é dado por:

$$W_{A \rightarrow B} = - \int_A^B \mu_c N \, dx = -\mu_c N (B - A). \quad [\text{A. 34}]$$

E, o trabalho realizado pelo mesmo para retornar de B até A :

$$W_{B \rightarrow A} = \int_B^A \mu_c N \, dx = \mu_c N (A - B) = -W_{A \rightarrow B}. \quad [\text{A. 35}]$$

²³Atuação de força de atrito pode ser simulada no site PHET: https://phet.colorado.edu/sims/html/forces-and-motion-basics/latest/forces-and-motion-basics_pt_BR.html.

²⁴ Tomando o cuidado, que uma pessoa subindo em uma rampa, possui uma força de atrito apontada no sentido do deslocamento, evitando que o mesmo não escorregue, e, outra oposta ao deslocamento de forma que ele suba na rampa.

De forma que somando as Equações [A.34] e [1.35], o trabalho total é igual a:

$$W_T = W_{A \rightarrow B} + W_{B \rightarrow A} = 2 W_{A \rightarrow B} = -2\mu_c N(\Delta x) \neq 0 \quad [\text{A.36}]$$

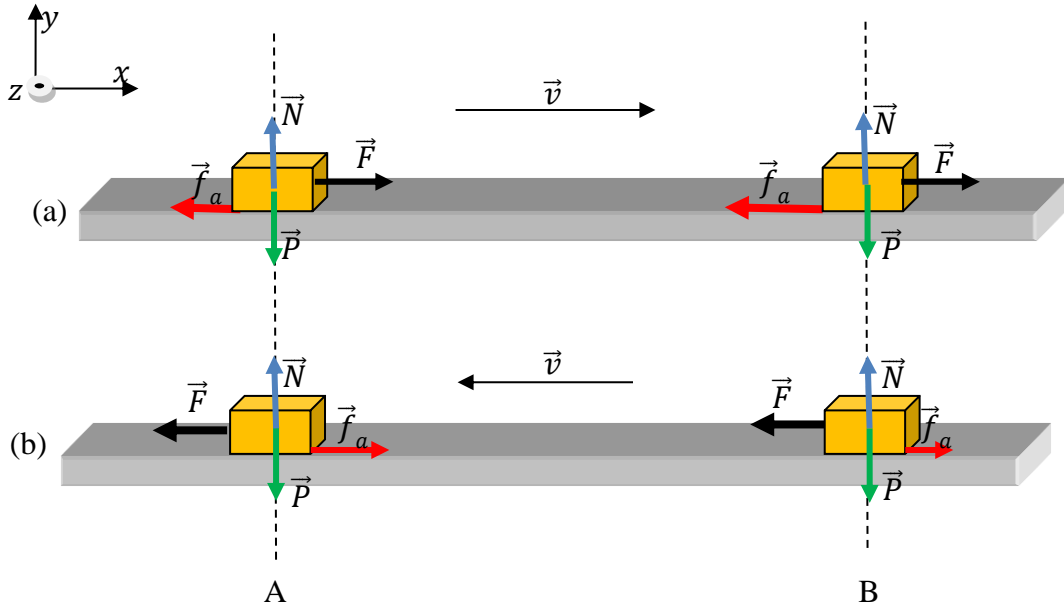


Figura A.10 - Representação das forças que atuam sobre um bloco ao entrar em movimento pela ação de uma força \vec{F} e atuação da força de atrito \vec{f}_a no caso cinético (superfície não lisa), (a) para ir de A até B e em (b) para retornar de B até A. As demais forças são: \vec{N} a força normal e \vec{P} a força peso estão em equilíbrio. Indicado ainda a velocidade (\vec{v}) do bloco e seu sentido de movimento. FONTE: o autor.

Diante do exposto, podemos afirmar que a força elástica e a força gravitacional (próximo à superfície da Terra – força peso) são conservativas: mostradas em termos do trabalho total realizado por elas em um percurso fechado ser nulo, e independente da trajetória (dependendo somente dos pontos inicial e final). Com relação à força de atrito, esta é não conservativa, mostrada por meio do trabalho total realizado em um percurso fechado, e complementado conforme afirmado por Halliday: “[...]. Se o trabalho total para o percurso completo não é nulo, diz-se que a força é não-conservativa.” [Hall11].

As forças não conservativas também são conhecidas por forças dissipativas, e dentro do conceito de energia, a seguir, apresenta-se o motivo da atribuição desse termo.

A.3.4 Energia Mecânica

Inicialmente podemos considerar que o termo energia pode tomar diversos significados de acordo com o contexto em que estiver sendo empregado. É comum ouvirmos: “Nossa, fulano tem muita energia!”, “Esse alimento vai te dar muita energia!”, “Precisa de muita energia para levantar esse carro!”. Ideias como essas são comuns em nosso cotidiano. Mas, o caráter científico do termo energia deve ser evidenciado.

Nas tentativas de elaborarem modelos para, posteriormente, poderem estudar os fenômenos, cientistas do século XIX observaram que em todos os fenômenos naturais, até então conhecidos, permaneciam como uma grandeza física que se mantinha constante após determinado processo físico ou químico. Essa grandeza foi denominada *energia*. O comportamento da energia inerente aos fenômenos naturais respeita à lei de conservação²⁵ de energia, enunciada como: “A energia do Universo é constante; não pode ser criada nem destruída, mas apenas transformada em diversas modalidades”. [Fuk16]

Richard Feynman²⁶ (1918-1988), físico estadunidense do século XX apresentou o seguinte pensamento em relação a esta lei:

“Ainda não sabemos o que é energia. Não sabemos por ser a energia uma coisa “estranha”. A única coisa de que temos certeza e que a natureza nos permite observar é uma realidade, ou, se preferir, uma lei, chamada conservação da energia. Essa lei diz que existe “algo”, uma quantidade que chamamos de energia, que se modifica em forma, mas que a cada momento que a medimos, sempre apresenta o mesmo resultado numérico. É incrível que algo assim aconteça [...] A energia se apresenta de diferentes formas, que podem ser mecânica, calorífica, química, nuclear, mássica. Apresentando-se sempre de formas variadas, com várias roupagens, mas sempre – e até hoje não encontramos exceção- sempre conserva. Algo realmente intrigante”. (Ciências. O que é Energia? Disponível em: <http://www.conteduc.dcc.ufba.br/index.php?option=com_content&view=article&id=59&Itemid=555>, Acesso em 07/12/2018).

Como exposto, Feynman nos tenta mostrar que o conceito de energia é abstrato, de difícil entendimento, o que pode levar as pessoas a definir esse termo de maneira equivocada [Fuk16]. No aspecto físico, pode-se entender energia como

²⁵Uma das leis de conservação mais famosas é a Lei de conservação de massas. Conforme postulado pelo químico francês Antoine Laurent Lavoisier em 1785, denominado de Lei de Lavoisier informa: “Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”. Portanto, algo que se conserva, depende somente de seu estado final que deve ser igual ao seu estado inicial.

²⁶Feynman conquistou em 1965, o Prêmio Nobel de Física, por resolver com sucesso problemas relacionados à teoria da eletrodinâmica quântica.

característica de um corpo ou de um sistema de corpos, relacionando-os com a sua capacidade em produzir movimento.

Existem muitos tipos de energia. Considera-se uma forma especial: a energia cinética, ou seja, a energia associada ao movimento de um corpo. Esta energia também pode ser armazenada em um sistema em termos de energia potencial, ou ser transformada em outras formas de energia, tais como, química, elétrica, térmica, entre outras. A seguir, apresentam-se os tipos de energia que iremos utilizar no presente trabalho: a Energia Mecânica que é composta da Energia Cinética e Energia Potencial.

A.3.4.1 Energia Cinética (E_c)

A energia cinética, E_c , de um corpo é uma grandeza escalar, definida como o *trabalho total que deve ser realizado sobre a partícula/corpo²⁷ para trazê-la de um estado de repouso até uma velocidade v .*

Isso pode ser demonstrado partindo da equação do trabalho (Eq. [A.22]), considerando de forma unidimensional para a situação física apresentada na Figura A.9 (de (a) até (d)) além da equação fundamental da dinâmica²⁸:

$$W = \int F dy \quad [A. 37]$$

A força que provoca o movimento é dada por: $F = m \frac{d|\vec{v}|}{dt} = m \frac{dv}{dt}$.

Sendo essa a segunda lei de Newton para o movimento. Que ao ser substituída na expressão do trabalho (Eq. [A.22]) fica escrita na forma:

$$W = \int m \frac{dv}{dt} dy. \quad [A. 38]$$

²⁷Como não estamos considerando as dimensões do corpo, e todas as forças atuam no centro de massa do mesmo, o corpo pode ser considerado como uma partícula.

²⁸ Esta mesma equação pode ser obtida considerando a cinemática (equação de Torricelli $v^2 = v_0^2 + 2 a d$) e dinâmica ($F = ma$). Logo: $W = F d \cos\theta$, em que, $\theta = 0^\circ$, força e deslocamento estão em um mesmo sentido: $W = Fd = m a d = \frac{m(v^2 - v_0^2)}{2} = \Delta E_c$.

Fazendo duas considerações na Equação [A.38]: de que a massa seja constante e substituindo $\frac{dy}{dt}$ pela velocidade v , ou seja, realizando uma mudança de variável, a Eq. [A.38] se torna:

$$W = m \int_{v_0}^v v \, dv. \quad [\text{A. 39}]$$

Integrando a Eq. [A.39] em v , resulta em:

$$W = \frac{1}{2} m (v^2 - v_0^2) = \Delta E_c. \quad [\text{A. 40}]$$

A Equação [A.40] é conhecida como o **Teorema Trabalho-Energia Cinética**, em que a quantidade $\frac{1}{2} m v^2$ é definida como energia cinética E_c , conforme apresentada na Equação [A.41]:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2. \quad [\text{A. 41}]$$

Independente qual seja a direção e sentido da velocidade \vec{v} , a energia cinética é sempre positiva. Lembrando que a energia é uma quantidade escalar, no caso a massa m é um escalar, bem como o termo da velocidade ao quadrado v^2 . Embora a energia cinética seja sempre positiva, a sua variação ΔE_c (Equação [A.30]) poderá ser positiva, negativa ou nula.

A próxima energia a ser apresentada é a energia potencial; veremos que essa é um tipo de energia que está associada às forças conservativas (apresentada na seção A.3.2).

A.3.4.2 Energia Potencial (E_p)

A energia potencial pode ser definida como um tipo de energia que pode ser armazenada em determinado corpo, podendo ser transformada em trabalho. Entre os tipos de energia conhecidos, daremos ênfase à energia potencial gravitacional e

energia potencial elástica. Destacamos que toda a energia potencial é produzida pela aplicação de uma força conservativa, conforme visto na seção A.3.2.

- Vejamos o caso do trabalho realizado por uma mola apresentado na Equação [A.25].

A quantidade $\frac{1}{2} k y^2$ é definida como a energia potencial elástica (no caso da mola). Assim, temos:

$$E_{Pel} = \frac{1}{2} k y^2 \quad [A. 42]$$

E, o trabalho realizado pela mola é dado por:

$$W_m = - \Delta E_p. \quad [A. 43]$$

- Enquanto que, o caso de uma massa abandonada verticalmente de uma altura (h_0) até um ponto mais baixo (h), em que somente atua a força peso \vec{P} (Figura A.11).

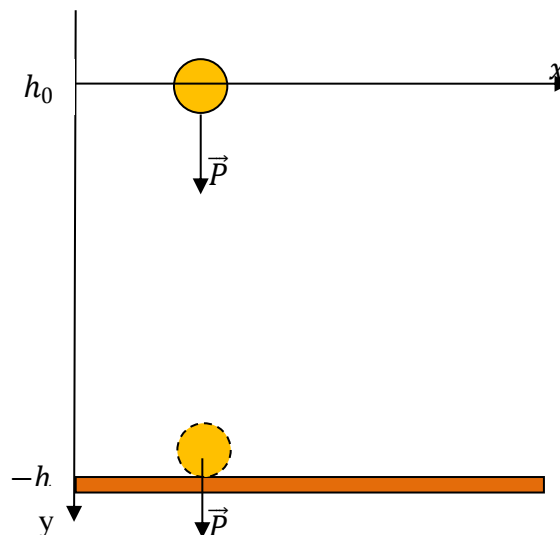


Figura A.11 - Figura ilustrativa indicando o referencial, utilizando o sistema cartesiano - plano (x,y), de liberação de um corpo de massa m , de uma altura h , sendo a única força atuando durante o movimento ser a força peso (\vec{P}). FONTE: o autor.

Para este corpo somente a coordenada y (considerada a vertical) é quem definirá como se arranjará esse sistema. Leva-se em consideração tal informação,

pois é necessário admitir casos em que analisamos o trabalho W sobre apenas um objeto do sistema.

Como afirmado por Halliday, 2011:

A energia potencial E_p é uma energia associada à *configuração* de um sistema. Aqui “configuração” significa como os componentes de um sistema estão dispostos com respeito aos demais (por exemplo, a compressão ou alongamento da mola no sistema bloco-mola; ou a altura da bola no sistema bola-Terra). (Halliday et al, 2011, p.292) [Hall11]

Como a única força atuante é a força peso desprezando as forças dissipativas, o trabalho realizado por essa força é dado por:

$$W = \int_{h_0}^{-h} P \, dy = \int_{h_0}^{-h} mg \, dy = mg \int_{h_0}^{-h} dy = -mg (h - h_0). \quad [\text{A. 44}]$$

Definindo a quantidade mgh como a (energia potencial gravitacional E_{p_G}), ou seja, que:

$$E_{p_G} = mgh. \quad [\text{A. 45}]$$

O trabalho (Equação [A.44]) será dado por:

$$W = -\Delta E_{p_G}. \quad [\text{A. 46}]$$

Portanto, podemos escrever independente da força conservativa em questão que, a Equação [A.46] nos apresenta, em caráter matemático, o trabalho realizado por uma força em uma dimensão. [Hall11]

$$\Delta E_p = E_p(y_f) - E_p(y_i) = W = - \int_{y_i}^{y_f} F_y \, dy. \quad [\text{A. 47}]$$

A Equação [A.47] permite determinar a diferença de energia potencial ΔE_p entre dois pontos y_i e y_f quando um determinado corpo sofre a ação de uma força

$|\vec{F}_y(y)|$. Ao utilizarmos um ponto arbitrário y em relação à referência y_0 , obtemos a Equação [A.48].

$$E_p(y) - E_p(y_0) = - \int_{y_0}^y Fy \, dy, \quad [\text{A. 48}]$$

podemos então escrever uma relação unidimensional entre a força conservativa e a energia potencial:

$$F_y = - \frac{dE_p}{dy}. \quad [\text{A. 49}]$$

A Equação [A.49] escrita de forma geral²⁹:

$$\vec{F} = - \vec{\nabla} E_p. \quad [\text{A. 50}]$$

Desta maneira, podemos dizer que a energia potencial é uma energia acumulada em determinado sistema por determinada força conservativa.

Vale frisar que uma vez armazenada, estas energias podem ser transformadas em energia cinética, ou seja, são capazes de produzir movimento. Esse fato pode ser visto matematicamente por meio da junção das Equações [A.40] e [A.43] em que:

$$\Delta E_c = -\Delta E_p. \quad [\text{A.51}]$$

Definidos a Energia Cinética associada ao movimento do corpo, e a Energia potencial que é a energia acumulada pelo corpo e que depende da configuração do sistema. E, que uma energia pode se transformar em outra e vice-versa, vejamos ao que esta transformação nos conduz.

A.3.5 Conservação da Energia Mecânica

²⁹ O termo: $\vec{\nabla}$ é denominado de gradiente. Em coordenadas cartesianas é escrito como derivada parcial em relação à posição de cada variável: x, y, z , indicadas as suas respectivas direções e sentidos: $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$.

Ao combinarmos os conceitos de energia cinética e energia potencial apresentados nas subseções A.6.1 e A.6.2, se obtém uma lei denominada *lei de conservação da energia mecânica* ou *princípio da conservação de energia mecânica*.

O físico Richard Feynman (1918-1988) considera o princípio de conservação de energia exato e sem exceções, ou seja, é uma lei que impera sobre todos os fenômenos da natureza.

Existe um fato, ou se você preferir, uma *lei* que governa todos os fenômenos naturais que são conhecidos até hoje. Não se conhece nenhuma exceção a essa lei – ela é exata até onde sabemos. A lei é chamada de *conservação da energia*. Nela enunciase que existe uma certa quantidade, que chamamos de energia, que não muda nas múltiplas modificações pelas quais a natureza passa. Essa é uma ideia muito abstrata, por que é um princípio matemático; ela diz que existe uma quantidade numérica que não muda quando algo acontece. Não é a descrição de um mecanismo ou algo concreto; é apenas um estranho fato de que podemos calcular algum número e, quando terminamos de observar a natureza fazer seus truques e calculamos o número novamente, ele é o mesmo (FEYNMAN, 2008, p.4-1). [*Feyn08*].

Concluimos por meio da Equação [A.51], que um aumento na energia cinética equivale à uma redução na energia potencial do sistema conservativo massa-mola, ou seja: $\Delta E_c = -\Delta E_p$.

Para um sistema constituído por muitos corpos interagindo entre si por meio de forças conservativas (elástica da mola, gravitacional, elétrica, dentre outras) podemos concluir que a mudança total na energia cinética de todos os corpos constituintes do sistema é igual em intensidade, porém oposta em sinal, à mudança total ocorrida na energia potencial do sistema. Essa definição está presente na Equação [A.52].

$$\Delta E_{c_{total}} = -\Delta E_{p_{total}}. \quad [A. 52]$$

De maneira a ter mais utilidade, podemos reescrever a Equação [A.51] conforme disposto na Equação [A.52]:

$$\Delta E_{c_{total}} + \Delta E_{p_{total}} = 0 \quad [A. 53]$$

A expressão matemática [A.53] afirma que, quando atuam apenas forças conservativas em um sistema, qualquer mudança na energia total deste, deverá ser equilibrada por uma mudança de igual valor e sinal oposto na sua energia potencial, visando à nulidade da soma de tais mudanças. Definindo o somatório: $\Delta E_{c_{total}} + \Delta E_{p_{total}}$ como variação a energia mecânica total $\Delta E_{m_{total}}$, a Equação [A.53] fica representada na forma:

$$\Delta(E_{c_{total}} + E_{p_{total}}) = \Delta E_{m_{total}} = 0. \quad [A.54]$$

E, da Equação [A.54] a quantidade $(E_c + E_p)$ denominada de energia mecânica (E_m) foi definida como:

$$E_c + E_p = E_m. \quad [A.55]$$

Caso haja uma variação em qualquer tipo de energia (cinética ou potencial) a variação da energia mecânica deverá permanecer constante. Condição válida somente na ausência de forças dissipativas.

A Equação [A.54], escrita na forma: $E_{m_{total_f}} - E_{m_{total_i}} = 0$ tal que:

$$E_{m_{total_i}} = E_{m_{total_f}}, \quad [A.56]$$

em que os índices i e f são as situações inicial e final da energia mecânica total do sistema, respectivamente, demonstrando que estas são iguais. Representamos matematicamente em [A.54] a lei da conservação da energia mecânica que é definida como:

Em um sistema isolado em que atuem apenas forças conservativas, a energia mecânica total permanece constante.

Uma vez agindo sobre um corpo em um sistema, as forças podem transformar energia potencial em cinética ou vice-versa. Além disso, pode-se converter um tipo de energia potencial em outro tipo de energia potencial, mas a energia mecânica total deverá ser constante. O atrito (neste caso apresentado como uma força não-conservativa, por dissipar a energia potencial, ou seja, realizar

trabalho negativo) caso passe a agir no sistema faz com que E_{total} não seja mais constante.

Nussenzveig (2002) afirma não conhecer força não-conservativa que viole o Princípio da Cons. de Energia, quando consideramos um sistema isolado. Além disso, o autor relata a importância do princípio de conservação de energia total de um sistema:

Nesse sentido mais amplo de conservação de energia *total*, podemos dizer que não se conhece nenhuma força não conservativa, ou seja, não foi descoberto até hoje nenhum fenômeno em que seja violado o princípio de conservação da energia total de um sistema isolado. Esta é uma das razões que fazem deste princípio um dos mais importantes da física. À medida que ampliamos nosso conhecimento dos fenômenos físicos, vemos surgir ampliações sucessivas do conceito de energia, inclusive, ao penetrarmos no domínio relativístico, com a célebre descoberta de Einstein da relação entre massa e energia. (Nussenzveig, 2002, p. 142). [Nus02]

Num sentido mais restrito do princípio de conservação de energia mecânica, consideremos o sistema massa-mola apresentado como principal proposta do presente PE. Ao determinarmos a constante elástica da mola k :

- Método estático: a transformação está entre energia potencial gravitacional em energia potencial elástica e vice versa;
- Método dinâmico: provocamos oscilações a um sistema constituído por energia potencial elástica (E_{PE}) presente na força que a mola exerce contra o movimento da massa e a potencial gravitacional (E_{PG}) pela massa estar posicionada a uma altura h da posição de alongamento máximo da mola. E a conversão dessas energias em energia cinética E_C e vice-versa.

De modo que, a soma das energias em ambas as situações têm como energias inerentes a cada sistema nulas.

A.3.6 Aplicações da Lei de Conservação de Energia Mecânica

Nesta seção apresentam-se três aplicações da Lei da Conservação de Energia Mecânica. As duas primeiras utilizando as equações obtidas até o momento sobre energia: determinação da expressão da constante elástica para os casos - estático e dinâmico; e a terceira aplicação de forma mais lúdica que trata da “lata mágica”.

O objetivo desta seção é relacionar os dois conceitos físicos desenvolvidos: Lei de Hooke e Conservação de Energia.

A.3.6.1 Constante Elástica – Método Estático

Nesta seção obter-se-á a Equação [A.12] por meio da lei de conservação da energia mecânica:

Essa lei informa que a energia mecânica total inicial é igual à energia mecânica total final. No sistema massa-mola da Figura A.1 (a), e readequado na Figura A.12, fica escrita na forma:

$$\begin{aligned} E_{m_i} &= E_{m_f} \\ E_{p_i} + E_{c_i} &= E_{p_f} + E_{c_f}. \end{aligned} \quad [\text{A. 57}]$$

Para isso, consideram-se as forças dissipativas desprezíveis, e a atuação somente das forças conservativas, no caso, a força peso e a força elástica (força da mola).

Abrindo a Equação [A.50], em coordenadas cartesianas:

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}E_p = \left(-\frac{\partial E_p}{\partial x}\hat{i}\right) + \left(-\frac{\partial E_p}{\partial y}\hat{j}\right) + \left(-\frac{\partial E_p}{\partial z}\hat{k}\right) = F_x\hat{i} + F_y\hat{j} + F_z\hat{k} \quad [\text{A. 58}]$$

Considerando a direção y , sentido para baixo indicado pelo vetor unitário \hat{j} , a energia potencial pode ser escrita em termos da força da seguinte forma:

$$E_p = -\int F_y dy. \quad [\text{A. 59}]$$

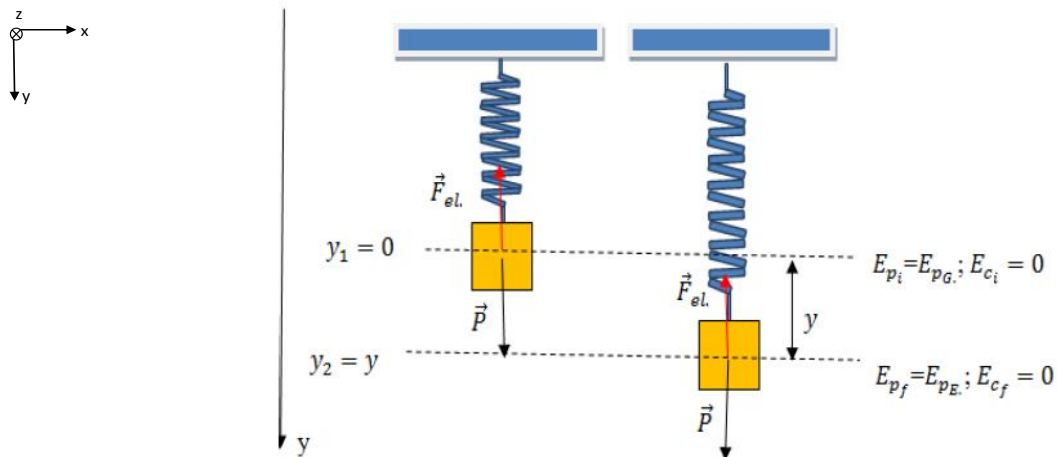


Figura A.12 - Figura esquemática de um sistema massa-mola para a obtenção da constante elástica para o método estático. As forças que atuam no sistema provocando um deslocamento Δy , são a força elástica $\vec{F}_{el.}$ e a força peso \vec{P} , em equilíbrio estático. Os índices *i* e *f* que acompanham as representações de energia cinética e potencial simbolizam os estados inicial e final, respectivamente. FONTE: o autor.

Utilizando a Equação [A.59] obtêm-se que a energia potencial gravitacional é dada por $E_{pG} = -mg\Delta y$ e a energia potencial elástica, por $E_{pE} = \frac{-k(\Delta y)^2}{2}$; conforme apresentado nas Equações [A.42] e [A.45]. Já a energia cinética (Equação [A.41]) seria dada por $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, mas como o sistema é estático $v = 0$, tal que a $E_c = 0$.

Por fim, substituindo as equações das energias potenciais e cinética na Equação [A.57]:

$$-mg\Delta y + 0 = -k(\Delta y)^2 + 0 \quad [\text{A.60}]$$

Isolando o termo da constante Elástica na Equação [A.60] obtém-se:

$$k = \frac{mg}{\Delta y} \quad [\text{A.61}]$$

Logo, obtivemos a Equação [1.61] que é idêntica à Equação [A.12], obtida na subseção A.2.2.1, via Leis de Newton.

Na sequência, vejamos como obter a expressão da constante elástica para o caso dinâmico a partir da lei de conservação de energia mecânica.

A.3.6.2 Constante Elástica – Método Dinâmico

Na Figura A.13 é apresentado o sistema massa-mola, para obter a Equação [A.20] que é a expressão da constante elástica para o método dinâmico, por meio da Lei de Conservação de Energia Mecânica.

Diante do exposto na Figura A.13, considera-se que as forças dissipativas são desprezíveis no tempo de oscilação, atuando somente as forças conservativas, que são a força peso e a força elástica. O corpo é liberado na posição inicial (i) e a nova posição de equilíbrio é a posição (f). Primeiramente será obtida a velocidade do corpo nesse ponto. Posteriormente, utiliza-se o conhecimento da cinemática para obter uma equação diferencial ordinária (EDO) de segunda ordem, cuja solução já foi vista (Equação [A.17]).

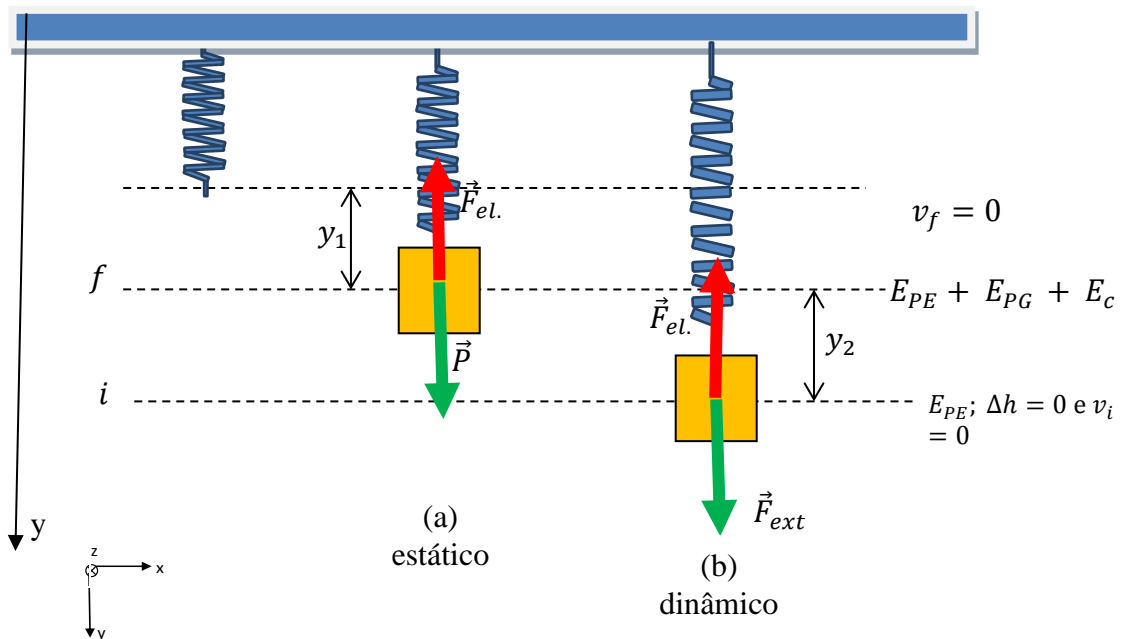


Figura A.13: Figura esquemática de um sistema massa-mola para obtenção da constante elástica do método dinâmico via lei da conservação de energia mecânica. As forças que atuam no sistema provocando um deslocamento $y_1 + y_2$ são: a força elástica (\vec{F}_{el}) e a força peso \vec{P} , em torno de um novo ponto de equilíbrio (f). FONTE: o autor.

Pela Lei de conservação de energia mecânica (Eq. [A.56]):

$$E_{m_i} = E_{m_f} .$$

Escrita em termos das energias potenciais: gravitacional (E_{PG}) e elástica (E_{PE}), e cinética (E_C): iniciais (i), e finais (f), tem-se que:

$$E_{PG_i} + E_{PE_i} + E_{C_i} = E_{PG_f} + E_{PE_f} + E_{C_f} \quad [\text{A. 62}]$$

Considerando a posição em i , dada por $y (= y_1 + y_2)$, as energias nas posições inicial e final na Equação [A.62] são respectivamente:

$$0 + \frac{1}{2}k (y_1 + y_2)^2 + 0 = \frac{1}{2}k y_1^2 + mg y_2 + \frac{mv^2}{2} \quad [\text{A. 63}]$$

Simplificando os termos iguais em ambos os lados da igualdade, obtém-se:

$$ky_1y_2 + \frac{ky_2^2}{2} = mgy_2 + \frac{mv^2}{2}, \quad [\text{A. 64}]$$

Como da Equação [A.61], $k = \frac{mg}{y_1}$, ponto de equilíbrio estático (no caso considerou-se $\Delta y = y_1$), na Equação [A.64] resta que:

$$\frac{ky_2^2}{2} = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow ky_2^2 = mv^2. \quad [\text{A. 65}]$$

Considerando a mola em oscilação, e que a velocidade da massa possa ser escrita em termos da aceleração como: $v^2 = -2a \frac{(y_1+y_2)}{2} = -a (y_1 + y_2) = -ay_2$, visto que em y_1 a aceleração é nula, a Equação [A.65] é reescrita da seguinte forma:

$$ky_2^2 = -may_2 \Rightarrow k y_2 = -m a = -m \frac{d^2y_2}{dt^2}. \quad [\text{A. 66}]$$

Sendo esta a equação diferencial ordinária (EDO) de segunda ordem, conforme nos apresenta a Equação [A.15], cuja solução é dada pela Equação [A.17], e satisfeita para $\omega^2 = \frac{k}{m}$. Lembrando que $\omega = \frac{2\pi}{T}$, recaímos na mesma expressão obtida via segunda lei de Newton (Equação [A.20]):

$$k = 4\pi^2 \frac{m}{T^2}. \quad [\text{A. 67}]$$

Retornando ao caso tratado na seção A.2.1, ao se considerar o caso dinâmico de duas molas em série ou em paralelo (Figura A.14), o resultado obtido por meio da Equação [A.67] é referente a constante elástica equivalente seja em série ou em paralelo, visto que as molas irão oscilar com o mesmo período T .

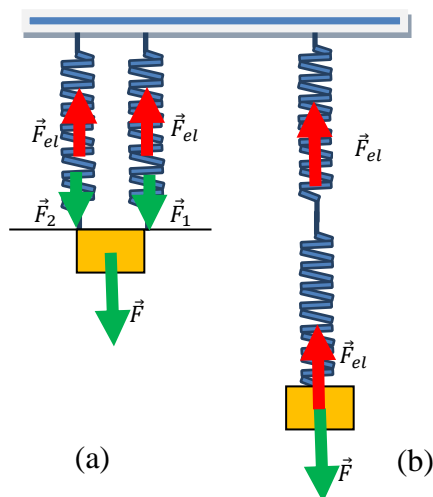


Figura A.14 - Desenho esquemático ilustrando a ação das forças elásticas \vec{F}_{el} e forças equivalentes \vec{F} em sistemas massa-molas. Em (a), pode-se observar um esquema de duas molas associadas em paralelo e em (b) duas molas associadas em série. Em ambos os casos, as molas oscilam com o mesmo período T e nestes casos obtemos a constante elástica k equivalente. FONTE: o autor.

Esclarecendo que caso fosse obter a constante elástica para o caso estático para as configurações ilustradas na Figura A.14, ficam válidos os raciocínios da seção A.2.1.

Após termos visto que a lei de conservação de energia mecânica é válida para o sistema massa-mola, desde que sejam desprezadas as forças dissipativas; e, que a energia armazenada na forma potencial se transforma em energia cinética e vice-versa. Apresenta-se a seguir, a teoria envolvida no armazenamento de energia potencial elástica de outra forma, não mais utilizando mola, mas um elástico torcido, deixando claro que se for substituído por uma mola torcida o resultado também é válido.

A.3.6.3 Armazenamento de Energia Potencial – A “lata energética”³⁰

A “lata energética” também conhecida por lata mágica, não somente induz a compreensão do armazenamento de energia potencial elástica, como sua transferência em termos de energia cinética, fazendo com que se mova. Portanto, em um curto período de tempo (em que se consideram as forças dissipativas desprezíveis), ocorre a conservação de energia mecânica, em que a energia potencial elástica armazenada por meio de um impulso na lata, transformando energia cinética em potencial, e a potencial elástica armazenada transforma de volta em cinética, trazendo a “lata” de volta (Figura A.15).

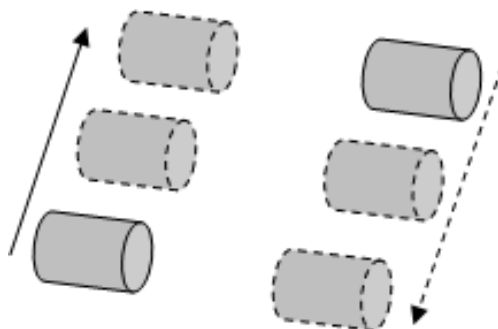


Figura A.15 - Desenho esquemático mostrando o movimento da “lata” de sair de um ponto e retornar ao mesmo ponto, somente pela atuação de uma força externa dando um impulso na lata. Por um sistema interno não visível, que funciona como um motor movido a “corda”. FONTE: o autor.

O “segredo” desse curioso movimento está no circuito interno, e, utiliza-se um elástico e uma massa presa em sua linha mediana para realização de tal movimento. Nesse sistema as extremidades do elástico estão presas nas laterais (tampa e fundo) da “lata”, utilizando, por exemplo, um palito de madeira. A massa presa pode ser uma pilha ou bateria, ou um parafuso com porca. Ao impulsionar a lata, ocorre a torção no elástico acumulando energia potencial elástica, e quando esse atinge um determinado ponto, para e essa energia acumulada é transformada em energia cinética, trazendo a lata de volta.

³⁰ Na página da Azeheb há um vídeo mostrando a montagem e o funcionamento: <https://azeheb.com.br/blog/experimento-de-fisica-lata-magica/>; ou de forma opcional, um mais elaborado: https://www.youtube.com/watch?v=c8LB9_E-2w4 acesso em 20/07/2019. Também conhecida como “lata” adestrada: https://www.youtube.com/watch?v=2_E5f-QxskM no manual do mundo. Acesso 20/05/2019.

Esse é um dos experimentos utilizados no Produto Educacional (PE) do presente trabalho, em que se exploraram duas formas de atuação, uma somente com o armazenamento de energia potencial elástica, considerando o movimento da lata em uma superfície na horizontal, e a outra forma considerando o armazenamento de energia potencial elástica e a gravitacional, considerando o movimento em um plano inclinado.

Esse sistema é interessante, pois também é possível trabalhar outros conceitos, como por exemplo: calcular a velocidade inicial de impulso, considerando a cinemática. E, caso se considere o atrito, trabalhar o conceito trabalho da força de atrito (W_{fa}) com a variação da energia mecânica ($W_{fa} = \Delta E_m$). Este último talvez mais a nível universitário.

Referências

- [Feyn08] FEYNMAN, Richard.(2008). *Lições de física de Feynman*. Trad. Adriana Válio Roque da Silva e Kaline Rabelo. Porto Alegre: Bookman.
- [Fuk16] FUKUI, Ana. (org.) [et al.]. (2016). *Ser protagonista: física, 1º ano: ensino médio*. 3. ed. 1. São Paulo: SM.
- [Guim14] GUIMARÃES, Osvaldo. PIQUEIRA, José R. CARRON, Wilson. (2014). *Física*. 1ª ed. 1. São Paulo: Ed. Ática.
- [Hall11] HALLIDAY, D. RESNICK, R. KRANE, K.S. (2011) *Física*. 5ª ed. 1. Rio de Janeiro: LTC.
- [Hall16] HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J. (2016). *Fundamentos de Física*. 10ª ed. 1: Mecânica. Rio de Janeiro: LTC.
- [Mer99] MERIAM, J. L. KRAIGE, L.G.(1999). *Mecânica – Dinâmica*. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC.
- [MukFer18] MUKAI, H. FERNANDES, P. R. G. (2018). *Manual de Laboratório de Física I*. Disponível em: <http://site.dfi.uem.br/downloads-apostilas/> Acesso em 17 de novembro de 2018.
- [Nus02] NUSSENZVEIG, H. Moysés. (2002). *Curso de Física Básica*. 1 – Mecânica. 4ª ed. São Paulo – SP: Edgar Blücher.
- [ParFís08] PARANÁ, Secretaria do Estado da Educação. (2008). *Diretrizes Curriculares da Educação Básica – Física*. Curitiba – PR: Jam3 Comunicações.
- [Per13] Peruzzo, J.A *Física através de experimentos - Termodinâmica, Ondulatória e Óptica* (2013). 1ª ed. 2. Irani – SC: Edição do autor.
- [Tor13] TORRES, C. M.A., FERRARO, N. G., SOARES, P. A. de T., PENTEADO, P. C. M. (2013). *Física Ciência e Tecnologia 1 – Mecânica*, 3ª ed. São Paulo: Ed. Moderna.

APÊNDICE B – Material para Impressão

Este apêndice está dividido em 4 etapas, uma para cada roteiro experimental sugerido no PE. Sendo as 3 primeiras para uso de um dos conjuntos experimentais doados pelo MEC, mais especificamente o de mecânica. Focados em explorar o sistema massa-mola para o estudo da Lei de Hooke associado a Lei de conservação de Energia Mecânica.

Ainda nesse último experimento abordou-se um sistema presente no livro didático público Ser Protagonista – Física; vol. 1 das Edições SM, tendo como Editora Responsável Ana Paula S. Nani. O manual, disposto na página 190 da 3ª edição, é a proposta como atividade laboratorial para o “fechamento” do Capítulo 8 que tem como tema principal “Energia e Trabalho”. Propuseram-se, neste trabalho, modificações na parte dos procedimentos, com a inclusão de um questionário prévio e na forma de aplicação. Assim, nesta SD a aplicação do experimento ocorreu de forma análoga, ou seja, antes do desenvolvimento da teoria, motivando os estudantes a construir seus próprios conceitos e cabendo ao professor o papel de mediador do mesmo. No tema envolvido, o foco é o armazenamento de energia potencial se transformando em energia cinética. E que por um curto período de tempo, pode-se tratar o movimento do sistema como uma aplicação da lei de conservação de energia. Ou em um caso mais geral a lei de conservação de energia, de forma que inclua as forças dissipativas.

Os roteiros aqui apresentados estão na sequência do aplicado pelo autor do presente trabalho. Portanto, caso queiram utilizar individualmente, em algumas situações deverão ter em mãos o roteiro anterior para auxiliar na montagem experimental. Os procedimentos experimentais e se o objetivo for somente obter a constante elástica por métodos diferentes são independentes. Porém a interpretação para melhor aproveitamento sugere-se comparar os resultados, portanto ficam interligados.

Apresentam-se em cada etapa a sequência o Questionário Prévio (QPr), o Roteiro do Experimento, e o Questionário Posterior (QPo).

B.1. ETAPA 01

B.1.1 Questionário 01 de concepções prévias (QPr1)

(Aplicado aos estudantes antes da realização do experimento 01: Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal: Lei de Hooke - Caso Estático).

01. O que você entende por elasticidade?

02. O que você entende por materiais deformáveis?

03. Como você diferenciaria materiais deformáveis de materiais indeformáveis?

04. O que você sabe sobre a Lei de Hooke?

05. O que entende por constante elástica?

06. Como você relacionaria um sistema massa-mola com a conservação de energia?

B.1.2 Roteiro experimental 01 (Exp. 01): Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - caso estático

Objetivos:

Verificar a lei de Hooke e determinar a constante elástica de uma mola helicoidal utilizando o método estático.

Materiais Utilizados:

- 01 suporte universal;
- 01 haste horizontal;
- 01 balança digital com aferição em gramas;
- 01 fixador metálico para pendurar a mola (suporte lateral);
- 01 régua de 30 cm;
- 01 fita adesiva;
- 01 tesoura sem ponta;
- 01 mola helicoidal A (mola com 1,5 cm diâmetro e 15,0 cm de comprimento do *kit* de mecânica);
- 07 a 08 massas de 20g cada (valores sugeridos).
- 01 m de fio de algodão ou de fio de nylon

Procedimento Experimental:

2. Monte o aparato experimental conforme a Figura 1(a). Utilize a fita adesiva para prender a régua de 30 cm ((5) na Figura 1) na lateral da haste vertical ((2) na Figura 1). Em (b) em destaque a altura para fixar a régua: a extremidade da mola deve estar alinhada na posição 0,00 cm da régua.
3. Enumere as massas e meça a massa individual ou de cada conjunto (sugestão: iniciar com 60 g + suporte para massas). Se as massas são de valores não conhecidos, ou se utilizar um suporte cujo valor da massa não possa ser desprezado como a de um pedaço de fio de nylon. Para utilizar o fio de nylon ou algodão como suporte una-as conforme indicado na Figura 1 (c). Se necessário una duas massas pelo fio, formando 4 conjuntos de massas separados. Anote valores do conjunto suspenso após realizar a aferição das mesmas em uma balança digital. Anote os dados das massas na Tabela 1;

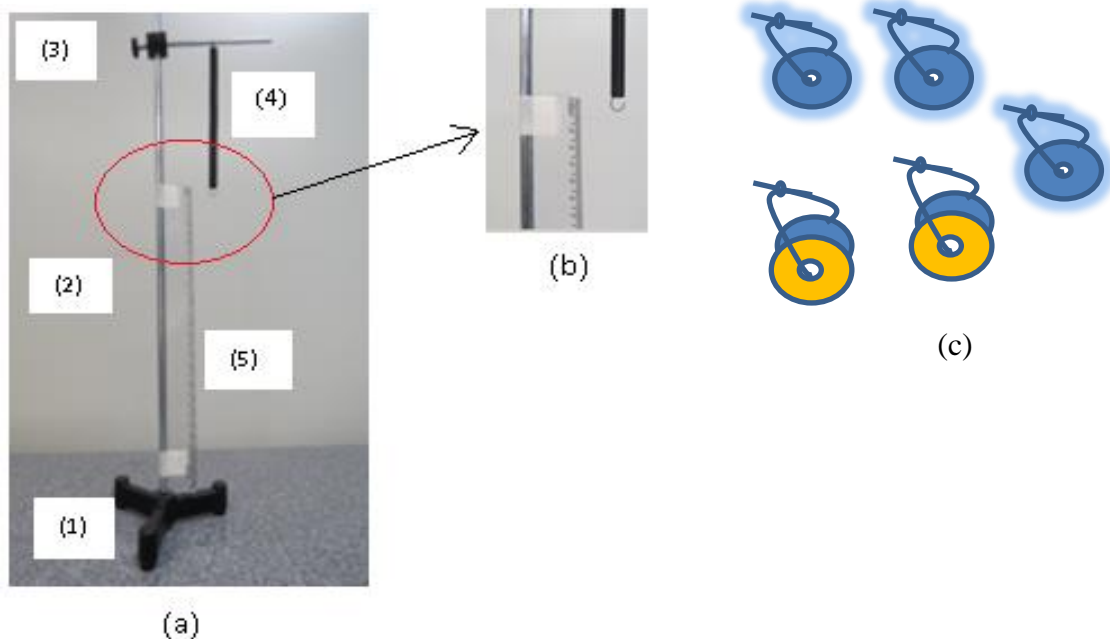


Figura 1 - (a) Foto da montagem inicial para determinação da constante elástica da mola A. Em que: (1) Base da haste; (2) Haste do suporte; (3) suporte lateral; (4) mola helicoidal; (5) régua. Em destaque (b) a indicação da posição do comprimento inicial da mola A, $L_0 = 0$ cm. (c) Desenho esquemático indicando um conjunto de 5 massas presas por fios (de algodão ou nylon), para ser suspensos diretamente no gancho da mola. FONTE: o autor.

4. Determine a força peso para as massas suspensas, por meio da equação: $F = P = m g$, adotando $g = 980 \text{ cm/s}^2$, anotando o valor obtido na Tabela 1, na coluna: $F = P$ (dinas);
5. Suspenda pelo fio ou suporte, o conjunto (60 g (massas aferidas) + suporte para massas) na extremidade da mola;
6. Verifique a distensão $\Delta L = L - L_0$ sofrida pela mola, anotando o valor obtido na Tabela 1 (coluna ΔL (cm));
7. Retire o conjunto ($m_1 = 60$ g (massas aferidas) + suporte para massas) e verifique se a mola volta para a posição inicial $L_0 = 0,00$ cm.
8. Retorne o conjunto de massas na extremidade da mola e acrescente nova(s) massa(s) (sugestão 20g), anote o deslocamento na Tabela 1.
9. Repita o passo 2 a 7 para as demais massas completando a Tabela 1.
10. Calcule a constante elástica por meio da Equação $k = \frac{F=P}{\Delta L}$.

Tabela 1 - Dados para determinação da constante elástica da mola A: Massa (g) são os valores das massas individuais a ser colocada no suporte para pendurar na mola; m_T (g) é a massa total formada pelas massas individuais mais seu suporte; P a força peso para $g = 980 \text{ cm/s}^2$ e ΔL (cm)) o deslocamento causada para cada conjunto de massas suspensas na mola. FONTE: o autor.

Massa(g)	Massa Total (m_T(g))	F (din) = $P = m_T \cdot g$	ΔL(cm)	$k = \frac{F}{\Delta L}$ (dinas/cm)
60				
80				
100				
120				
140				
Média aritmética da constante elástica (k) da mola				
Massa do Gancho: _____g (caso seja utilizado).				

B.1.3 Questionário Avaliativo 01 (QPo1)

A ser aplicado posteriormente realização do Experimento 01 (Exp. 01)

a) O que aconteceu com os valores de ΔL , à medida que F aumentou?

b) Confeccione numa folha de papel milimetrado (Figura 2) o gráfico de F em função de ΔL .

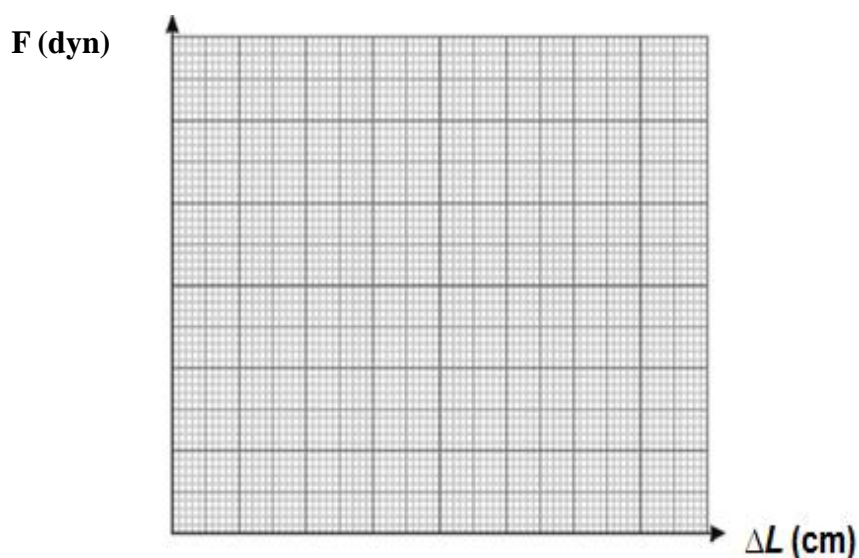


Figura 2: Gráfico força (F) em dinas (dyn) versus a variação de distensão da mola (ΔL) medida em centímetros (cm). FONTE: o autor.

c) Qual é a relação existente entre F e ΔL ?

d) Sendo uma relação linear entre F e ΔL , trace uma reta média entre os pontos experimentais obtidos e determine o coeficiente angular dessa reta com suas respectivas unidades.

e) Sendo uma relação linear entre F e ΔL , trace uma reta média entre os pontos experimentais obtidos e determine o coeficiente linear dessa reta.

f) Qual é o significado físico dos coeficientes angular e linear obtidos nos itens “d” e “e”?

g) A mola ultrapassou o limite de elasticidade? O que seria esse limite de elasticidade?

h) Os resultados obtidos comprovam a lei de Hooke? Em caso afirmativo, enuncie a lei.

B.2 ETAPA 2

B.2.1 Questionário 01 de concepções prévias (QPr1)

(A ser aplicado antes da realização do Experimento 02 (Exp. 02) - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - caso dinâmico)

01. Você acha que seria possível determinar a constante elástica de uma mola usando-se movimentos oscilatórios?

02. Qual a sua definição para movimento oscilatório?

03. De acordo com a etapa I que você realizou, é possível chegar a um mesmo valor de k usando-se procedimentos diferentes?

04. De acordo com suas concepções, qual(is) é (são) o(s) principal (is) erro(s) que pode(m) ocorrer na realização da etapa II (caso dinâmico) para determinar a constante elástica de uma mola?

B.2.2 Roteiro experimental 02 (Exp. 02) - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - caso dinâmico.

Objetivos:

Verificar a lei de Hooke e determinar a constante elástica de uma mola helicoidal utilizando-se de movimentos oscilatórios.

Materiais Utilizados:

01 suporte universal;

01 haste vertical;

01 balança digital com aferição em gramas;

01 fixador metálico para pendurar a mola (suporte lateral);

01 régua de 30 cm;

01 fita adesiva;

01 tesoura sem ponta;

01 mola helicoidal (mola com 1,5 cm de diâmetro e 15,0 cm de comprimento *dokit* de mecânica);

01 conjunto de massas (sugestão: utilize as massas do Exp. 01, 20g cada, o ideal é utilizar uma quantidade total em que o movimento oscilatório permita uma boa aferição do tempo – faça testes para ver qual o melhor - esse valor permanecerá fixo).

01 suporte de massas ou utilizar o fio de algodão ou de nylon como suporte para as massas;

01 cronômetro.

Procedimento Experimental:

(c) Monte o aparato experimental, utilizando o suporte universal e prendendo com fita adesiva a régua de 30 cm na lateral da haste vertical, como apresentado na Figura 1 (a) da parte estática.

(d) Posicione a extremidade inferior na mola em $L_0 = 0,00$ cm (Figura 1(b) da parte estática).

(e) Meça a massa do conjunto (massa + suporte para massas (anote na Tabela 2)); Para facilitar utilize as mesmas massas do Exp. 01 para formar o

conjunto a ser utilizado. Caso vá executar somente este experimento, prepare as massas conforme indicado na Figura 1 (c).

- (f) Suspenda o conjunto (massa + suporte para massas) na extremidade da mola;
- (g) Puxe ou eleve (observe na régua o quanto foi alongada ou elevada, para que possa liberar sempre do mesmo ponto) manualmente a(s) massa(s) no sentido vertical tal que saia da posição de equilíbrio, solte o conjunto de massas e simultaneamente acione o cronômetro que deve estar zerado. Cronometre o tempo total para realizar três oscilações completas (1 oscilação completa = 1 período (T) = o processo ida e volta);
- (h) Para a mesma massa repita 10 vezes o processo do item 5. Lembre-se de zerar o cronômetro a cada tomada de tempo.
- (i) Determine o valor do período, T , de oscilação do sistema a partir dos valores médios dos tempos (tempo total dividido pelo número de oscilações – nesse caso, três). Após, divida pelo número de repetições (no caso 10) para obter o valor do período médio. Anote os valores na Tabela 2.

Tabela 2 - Tempos medidos e período médio para três oscilações completas, repetindo-se dez vezes o processo. FONTE: o autor.

Processo (medida)	Tempo total medido (s)	Período médio (s)
01		
02		
03		
04		
05		
06		
07		
08		
09		
10		
Tempo de 01 Período das 10 repetições ($T_m(s)$)		
Massa total suspensa ($m(g)$)		
$k_{dinâmico} \left(\frac{dyn}{cm} \right)$		

- (j) Para a determinação da constante elástica da mola helicoidal utilizada,

remetemos à Equação: $k_{dinâmico} = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$

Considere $\pi = 3,14$. Use o período médio (T_m) em T .

B.2.1 Questionário Avaliativo 02 (QPo2)

(A ser aplicado após a realização do Experimento 02 (Exp. 02))

a) Determine a constante elástica, utilizando-se do processo dinâmico (lembrando-se que se trata de movimento oscilatório).

b) O valor de k obtido foi o mesmo em relação ao que o grupo conseguiu no processo estático?

c) A mola ultrapassou o limite de elasticidade? O que seria esse limite de elasticidade?

d) Os resultados obtidos comprovam a lei de Hooke? Como pode afirmar isso?

e) Quais foram as dificuldades e facilidades que você pode apontar na realização deste experimento?

B.3 ETAPA 03

B.3.1 Questionário 03 (QPr3) concepções prévias

(A ser aplicado aos estudantes antes da realização do experimento 03 - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal: Lei de Hooke - Associação de molas em Série e em Paralelo)

01. O que você entende por associação de molas?

02. Você acha ser possível determinar a constante elástica de mais de uma mola por vez? Como?

03. Qual deve ser o valor teórico da constante elástica da associação em série, de acordo com seu raciocínio? (o dobro, a metade ou a raiz quadrada da constante de uma das molas).

04. Qual deve ser o valor teórico da constante elástica da associação em paralelo, de acordo com seu raciocínio? (o dobro, a metade ou a raiz quadrada da constante de uma das molas).

05. Você acha que ao se utilizar mais de uma mola e tentamos determinar sua constante elástica, estamos mais propensos ao erro? Por quê?

06. Como você relacionaria uma associação de molas (em série ou em paralelo) com o princípio de conservação de energia?

B.3.2 Roteiro experimental 03 (Exp. 03) - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal utilizando a associação de molas em série e em paralelo.

Objetivos:

Verificar a lei de Hooke e determinar a constante elástica de duas molas helicoidais utilizando-se de métodos de associação de molas: série e paralelo.

Materiais Utilizados:

- 01 suporte universal;
- 01 haste vertical (presa ao suporte universal);
- 01 balança digital (verifique o limite de gramatura);
- 01 fixador metálico para pendurar a mola (Suporte lateral/horizontal);
- 01 régua de 100 cm;
- 01 fita adesiva;
- 02 molas helicoidais de mesmo comprimento e diâmetro (sugestão: duas molas iguais a utilizada no Exp. 01);
- 01 conjunto contendo 07 a 08 massas aferidas com 20g cada (utilizar as mesmas massas do Exp. 01);
- 01 suporte de massas ou utilizar o fio de algodão ou de nylon como suporte para as massas, conforme indicado na Figura 1 (c) do Exp. 01;

Procedimento Experimental:

1. Monte o sistema experimental da Figura 3, utilizando o suporte universal e prendendo com fita adesiva a régua de 100 cm na lateral da haste vertical (É a mesma montagem apresentada na Figura 1, somente posicionando a origem da régua na parte inferior da mola inferior, pois as molas estão associadas em série, se necessário adote uma a régua mais longa);
2. Associe as molas em série (Figura 3(b)) e a massa m no gancho da mola suspensa no suporte lateral, conforme ilustrado na Figura 3 (b) - (c).

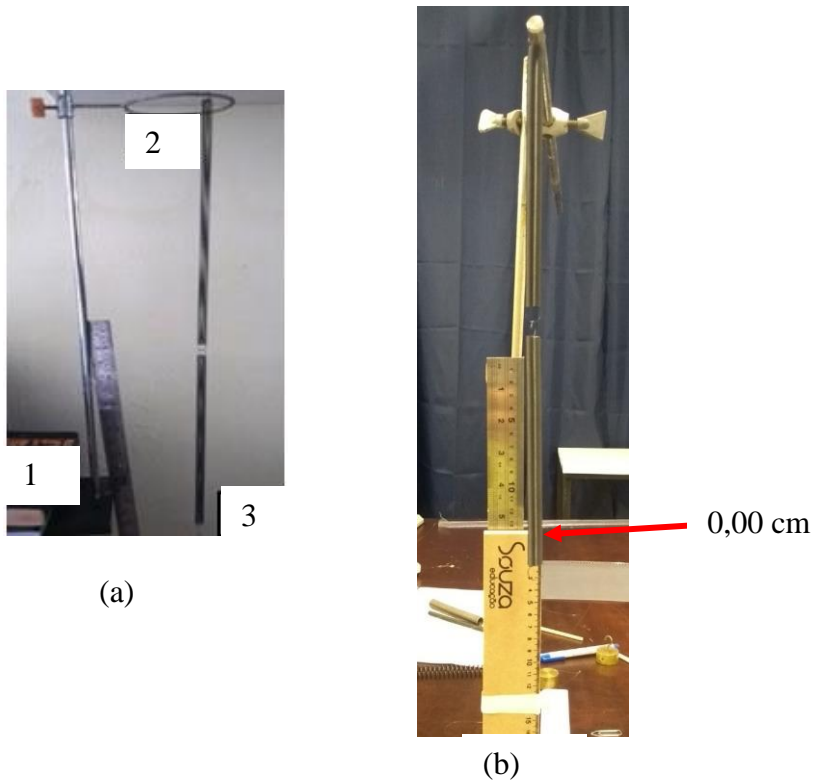


Figura 3 - Fotografia de duas molas associadas em série. Em (a): (1) o suporte universal sobre uma mesa e a régua posicionada na vertical; (2) suporte lateral (no caso, uma argola metálica) a qual uma das extremidades do sistema ficará suspenso; (3) massa m aferida e seu respectivo suporte. E, em (b), a régua de madeira foi utilizada por ser mais longa e indicando a extremidade da mola inferior na posição 0,00 cm. FONTE: o autor.

3.1.1 Parte Estática

3. Utilize a mesma sequência de massas já selecionadas, enumeradas e aferidas no Exp. 01, anote seus valores na sequência na Tabela 3 – parte estática;
4. Na sequência da enumeração, suspenda a massa 1 na mola inferior, e anote o deslocamento (ΔL (cm)) provocado pela massa no sentido vertical na Tabela 3.
5. Acrescente a massa 2, e repita o procedimento 4;
6. *Repita o item 5, para as demais massas;*

3.1.2 Parte dinâmica

7. Escolha um conjunto de massa, sugestão utilizar o conjunto da parte dinâmica de 1 mola (Exp. 02) aferir e anotar sua massa m_T na Tabela 3. Caso vá executar somente este experimento, prepare as massas conforme indicado na Figura 1 (c).
8. Suspenda ou puxe a massa suspensa (anotar na régua o quanto foi alongada, para liberar sempre do mesmo ponto) e ao liberar acione no mesmo instante o

cronômetro, conte 3 oscilações completas, e trave o cronômetro. Anote o resultado do tempo, zere o cronometro e repita por mais 5 vezes. Caso a mola se mova no suporte, fixe-a com fita adesiva de forma que não atrapalhe o movimento oscilatório;

9. Para comparar os resultados, determinar a constante elástica da série k_s , utilizando a Equação:

$$\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{1}{k_s} .$$

Usando as constantes elásticas k_1 e k_2 obtidas na Etapa 1- caso estático, e compare os resultados obtidos.

Tabela 3 - Dados (a) parte estática do deslocamento para cada conjunto de massas suspensas e (b) parte dinâmica: tempo total (t) em segundos, de 3 períodos de oscilações determinados na associação em série de duas molas helicoidais. Em que a massa é uma massa m suspensa de valor fixo em gramas, Período médio do tempo de 3 oscilações e a média das 5 repetições. FONTE: o autor.

Estático				Dinâmico			
Medida	Massa(g)	$\Delta L(cm)$	Peso (dinas)	Massa (g)	Medida	Tempo total (t) de 3 oscilações completas em segundos	Período de oscilação (s) $T = \frac{t}{3}$
1					1		
2					2		
3					3		
4					4		
5					5		
						$T_{médio}(s)$	

3.2 Associação em Paralelo

10. Para a associação das molas em paralelo, monte o sistema experimental da Figura 4, utilizando o suporte universal e prendendo com fita adesiva a régua de 100 cm na lateral da haste vertical (É a mesma montagem apresentada na

Figura 1 (Exp. 01), posicionando as molas tal que fiquem paralelas uma em relação a outra)

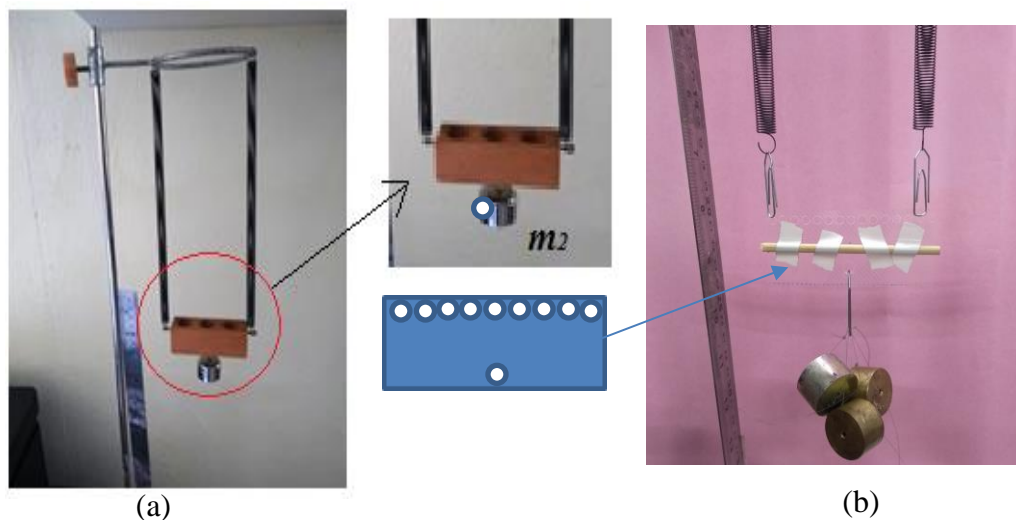


Figura 4- Imagem fotográfica de duas molas associadas em paralelo. (a) Em destaque apresentamos a fotografia da massa m_2 e do suporte para massas de madeira, e em (b) o sistema utilizando o suporte alternativo (pedaço da capa de caderno de espiral – no caso uma capa transparente e um pedaço de madeira para mantê-la reto ao adicionar as massas), confeccionado pelo autor, a serem utilizados nessa etapa do Exp. 03. FONTE: o autor.

3.2.1 Parte Estática

11. Utilize a mesma sequência de massas já selecionadas, enumeradas e aferidas no Exp. 01, anote seus valores na sequência na Tabela 4 – parte estática;
12. Na sequência da enumeração, suspenda a massa 1 na mola inferior, e anote o deslocamento provocado pela massa no sentido vertical;
13. Repita o item 3) para as demais massas, acrescidas uma a uma e medindo o deslocamento (ΔL (cm)) ocorridos por cada conjunto suspenso; Anote os dados na Tabela 4.

3.2.2 Parte Dinâmica

14. Escolha um conjunto de massa, sugestão utilizar o conjunto da parte dinâmica de 1 mola (Exp. 02) aferir e anotar sua massa $m_T = \underline{\hspace{2cm}} g$;
15. Fixe a massa conforme indicado na Figura 4, essa deve ficar suspensa de forma equilibrada, ou seja, no ponto médio das duas molas;

Observação: Um sistema optativo para o suporte de massa indicado na Figura 1.6 (a) é o indicado na Figura 1.2 (e), cujo sistema todo montado é o da Figura 1.6 (b). Observando o uso de *clips*, para fixar o suporte nas molas, bem como um terceiro *clips* centralizado na parte inferior para pendurar as massas.

7. Elevar ou puxar na vertical o sistema suspenso pelo seu ponto médio e liberar a massa m_T (observar essa altura na régua para liberar sempre do mesmo ponto). Acione simultaneamente o cronômetro e trave quando contar 3 oscilações completas; Evitar deslocar o sistema para os lados gerando movimentos aleatórios no sistema oscilante. Anote os dados na Tabela 4.
8. Zere o cronômetro a cada tomada de tempo;
9. Repetir os itens 7 e 8 por mais cinco vezes, completando a Tabela 4.

Tabela 4 - Períodos de oscilações determinados na associação em paralelo de duas molas helicoidais. Dados (a) parte estática do deslocamento para cada conjunto de massas suspensas e (b) parte dinâmica: tempo total (t) em segundos, de 3 períodos de oscilações determinados na associação em série de duas molas helicoidais. Em que a massa é uma massa m suspensa de valor fixo em gramas, Período médio do tempo de 3 oscilações e a média das 5 repetições. FONTE: o autor.

Estático				Dinâmico			
Medida	Massa(g)	$\Delta L(cm)$	Peso (dinas)	Massa (g)	Medida	Tempo total (t) de 3 oscilações completas em segundos	Período de oscilação (s) $T = \frac{t}{3}$
1					1		
2					2		
3					3		
4					4		
5					5		
						$T_{médio}(s)$	

11. Determinar a constante elástica da associação em paralelo k_p , utilizando a Equação :

$$k_p = k_1 + k_2 ,$$

com os dados das constantes elástica de cada mola obtidas pelo método estático (Exp. 01), considerando que as molas são iguais.

União dos dados dos Experimentos 1, 2 e 3:

Completar a Tabela 5 a partir da repetição dos procedimentos listados. Da parte 1, 2 e 3 estática.

Tabela 5 – Dados da parte estática dos experimentos 1, 2 e 3.

		1 mola	Molas em série	Molas em paralelo
Massa (g)	Força Peso (dinas)	ΔL (cm)	ΔL (cm)	ΔL (cm)

Parte dinâmica:

Do Exp. 02, transfira o dado do período médio da Tabela 2 e coloque na Tabela 6. E, faça o mesmo com os dados do Exp. 03 da parte dinâmica, com os resultados da constante dinâmica obtida experimentalmente por meio da Equação: $k_{din.} = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$.

Tabela 6 - Dados do período médio de 3 oscilações das Tabelas: 2.2, 2.3 e 2.4, obtidos da realização dos Experimentos 02 e 03 por meio do período médio e da massa oscilante e ela equação que depende somente das constantes elásticas das molas, considerando as molas iguais. FONTE: o autor.

	Massa (g) utilizada	01 mola – Experimento 02	Associação em série – Exp. 03	Associação em paralelo – Exp. 03
$k_{dinamico} \left(\frac{dyn}{cm}\right)$				
$k_s \left(\frac{dyn}{cm}\right)$				
$k_p \left(\frac{dyn}{cm}\right)$				
D(%)				

B.3.3 Questionário Avaliativo 03 (QPo3)

(A ser aplicado após a realização do Experimento 03)

a) Calcular o valor da constante elástica (experimental) da associação em série.

b) Calcular o valor da constante elástica (experimental) da associação em paralelo.

c) Destacar as principais diferenças entre a associação de molas helicoidais em série e em paralelo.

c) Confeccionar o gráfico que relaciona a força peso da associação em série versus o deslocamento, de preferência em papel milimetrado (Figura 12). Para isso utilize os dados da Tabela 3 referente ao Exp. 03 – série.

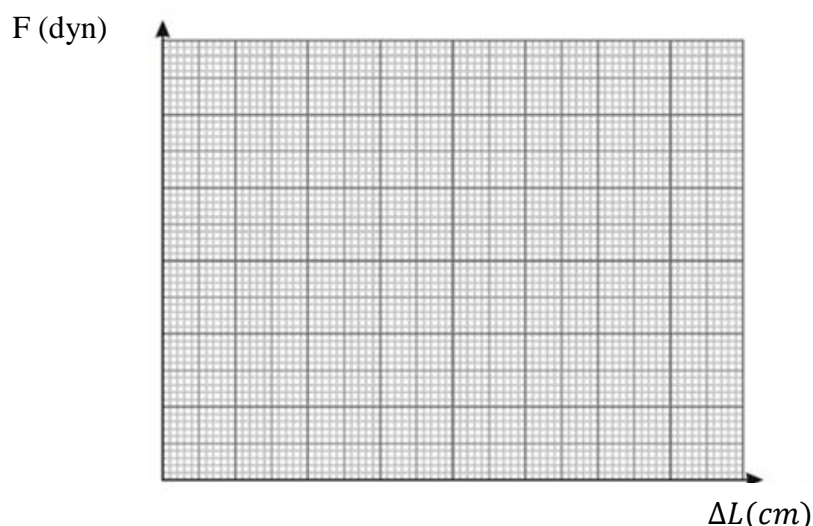


Figura 12 - Gráfico da força peso (F) em dinas (dyn) da associação de duas molas iguais em série versus o deslocamento (ΔL) cm. FONTE: o autor.

d) Confeccionar o gráfico que relaciona a força peso da associação em paralelo versus o deslocamento, de preferência em papel milimetrado (Figura 13). Para isso utilize os dados da Tabela 4 referente ao Exp. 03 – paralelo.

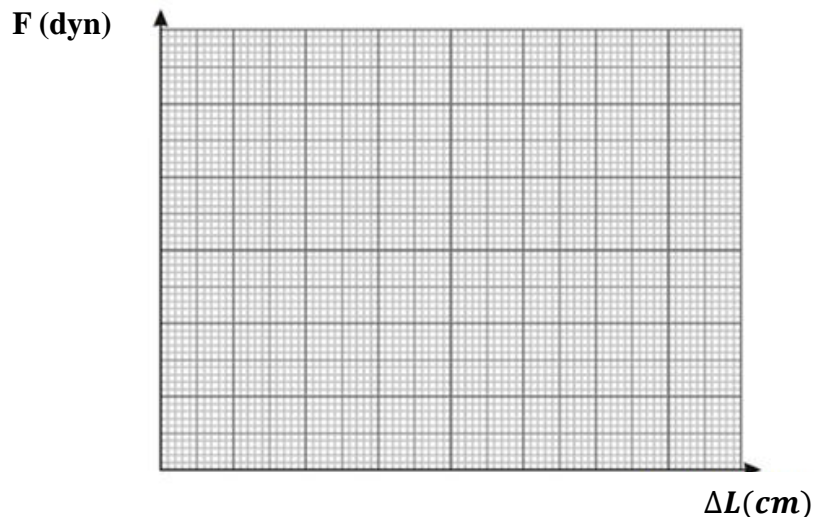


Figura 13 - Gráfico da força peso (F) em dinas (dyn) da associação de duas molas iguais em paralelo versus o deslocamento (ΔL) cm. FONTE: o autor.

e) A partir da confecção dos gráficos, indicar o valor numérico dos quocientes de uma única mola e de ambas as associações que correspondem à inclinação dos gráficos. E, compare os resultados quando obtidos por meio das equações, complete a Tabela 7.

Tabela 7 - Valores das constantes elásticas obtidas por meio das Equações e considerando a média dos valores e por meio da inclinação das retas dos gráficos.

	Caso estático			Caso Dinâmico		
	1 mola	Molas em série	Molas em Paralelo	1 mola	Molas em série	Molas em Paralelo
	$k_1 \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}} \right)$	$k_s \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}} \right)$	$k_p \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}} \right)$	$k_1 \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}} \right)$	$k_s \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}} \right)$	$k_p \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}} \right)$
Equação/Teoria						
Equação/Média						
Gráfico (reta ajustada)						
D(%)						

Sugestão:

a) Confeccionar os três gráficos em uma única figura e comparar a inclinação das retas. Utilizar os dados das Tabelas 1, 3 e 4.

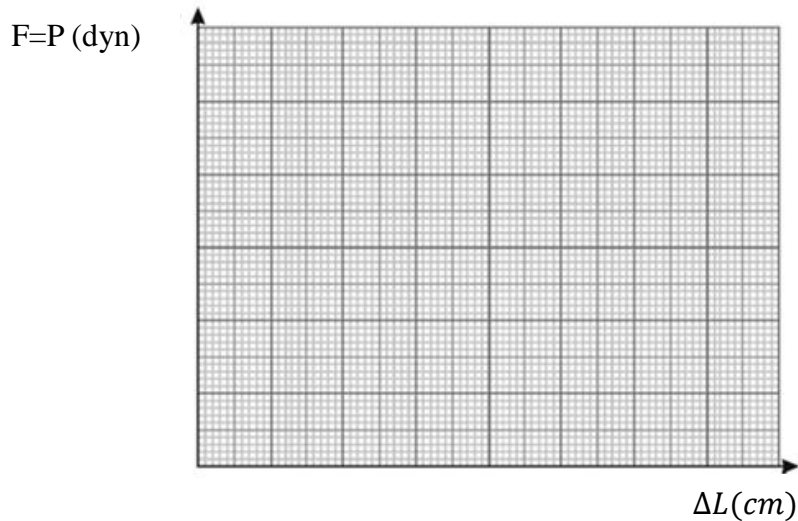


Figura 14 - Gráfico da parte estática da força peso ($F=P$) em dinas (dyn) versus o deslocamento (ΔL) cm para uma mola (mola 1), e as configurações em série e em paralelo para duas molas iguais a mola 1. Confeccionado com os dados da Tabela 1, 3 e 4. FONTE: o autor.

b) Comparar os períodos do movimento oscilatório.

Complete a Tabela 8, e analise os resultados.

Tabela 8 – Dados dos períodos médios para cada sistema massa-mola: mola de cm e diâmetro de cm e massa de g. Extraídos das Tabelas 2.4; 2.5 e 2.6. Fonte: o autor.

Configuração	Período médio: T_m (s)	
1 mola	T_1 (s)	
Molas série	T_s (s)	
Molas paralelo	T_p (s)	

c) Relate as principais dificuldades encontradas na realização do experimento.

d) Relate também as suas considerações favoráveis em relação ao experimento.

B.4 – ETAPA 4

B.4.1 Questionário de concepções prévias (QPr4)

(A ser aplicado aos estudantes antes da realização do experimento 04: Conservação de energia em materiais elásticos: o curioso caso da “lata energética”)

01. Você acha ser possível construir um sistema de armazenamento de energia mecânica? Como você o faria?

02. Qual a relação entre uma mola helicoidal com um elástico?

03. Como a energia mecânica pode estar associada em um sistema massa-mola?

04. O que você entende por transformação de energia?

05. O que você entende por energia potencial elástica?

B.4.2 Roteiro experimental 04 (Exp. 04) - Conservação da Energia em materiais deformáveis - o curioso caso da “lata energética” a partir do armazenamento de energia mecânica.

Materiais Utilizados:

- 01 recipiente (lata ou um frasco de plástico tipo maionese vazio);
- 01 elástico do tipo chato contendo 5 mm de largura e 40 cm de comprimento;
- 01 mola helicoidal;
- 01 parafuso grosso com porca (tipo: 1/4 x 7/8 polegadas);
- 02 palitos de fósforo;
- 03 pregos com cabeça (tipo: 17 x 21 polegadas);
- 01 martelo;
- 01 alicate.

Procedimentos:

1. Faça um furo centralizado, com o prego e o martelo, bem no meio da tampa do recipiente (lata ou frasco). Se necessário, aqueça a ponta do prego (segure o mesmo com um alicate) utilizando a chama de um fogão, ou leve o recipiente furado. (CUIDADO: faça esse procedimento com o auxílio de um adulto!).
2. Faça um segundo furo centralizado, agora no fundo do recipiente utilizando o prego e o martelo, martelo caso seja um recipiente de plástico segure o prego com um alicate, aqueça a extremidade pontiaguda do prego e fure o fundo do recipiente e sua tampa. Cuidado para não tocar no prego caso o aqueça;
3. Rosqueie a porca até a cabeça do parafuso.
4. Faça um nó no elástico e prender o mesmo entre o parafuso e a porca. Observe que o parafuso deve ficar no ponto médio no sentido mais longo do frasco, conforme indica a Figura 14..
5. Passe uma extremidade do elástico pelo furo, mantendo a outra extremidade do lado de fora da tampa presa com um palito. Passar a outra extremidade pelo outro furo, localizado na tampa (Figura 14). O recipiente deve estar bem fechado pelo elástico, ficando o parafuso e a porca na sua parte interna.

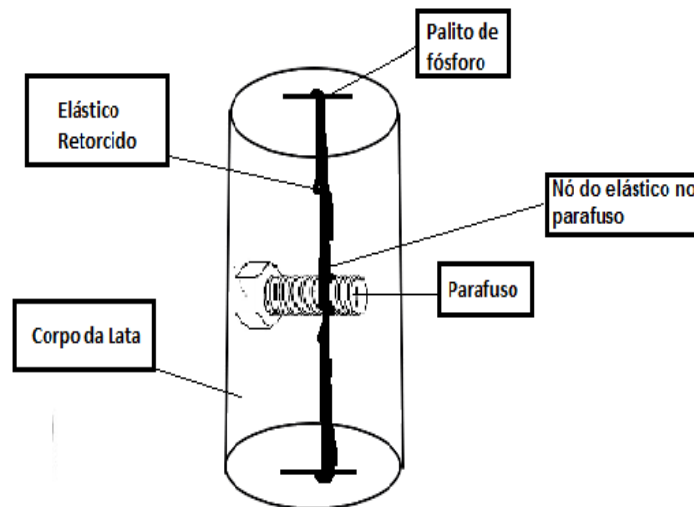


Figura 14: Desenho ilustrativo da montagem da “lata energética”. FONTE: o Autor.

6. Balance o recipiente de forma que o parafuso gire o elástico.
7. Coloque a lata/recipiente em uma superfície plana e ver o que ocorre.
8. Repita o procedimento 6 e colocar a “lata energética” em uma superfície que contenha uma pequena inclinação e observar o que acontece.
9. Substitua o conjunto elástico + parafuso por uma mola helicoidal e prendê-la nos furos contidos na lata com o auxílio de um prego (17 x 21). Utilize o alicate para ter mais precisão no momento em que for amarrar as extremidades da mola aos pregos.
10. Rosqueie um dos pregos da “lata energética” ao qual a mola está fixa e posicionar a lata/recipiente em uma superfície plana e impulsioná-la de modo que a mesma role.
11. Observar e discutir sobre o que acontece.

Observação: o passo 6, pode ser substituído dando um impulso na lata fazendo-a rolar na superfície.

B.4.3 Questionário Avaliativo 04 (QPo4)

(A ser aplicado após a realização do Experimento 04 (Exp. 04))

a) Qual a função, da lata/recipiente, do elástico e do parafuso com a porca?

b) Que tipos de transformação de energia estão envolvidos no comportamento da lata/recipiente nas duas situações (quando rodada na superfície horizontal e quando colocada na rampa)?

c) Que modificações você propõe para que a lata/recipiente atinja maior alcance ao ser rodada na superfície horizontal?

d) É possível substituir o elástico retorcido por uma mola helicoidal? O sistema funcionaria da mesma forma?

e) Indique uma maneira de fazer a lata/recipiente rolar sem um impulso inicial. Descreva esse processo.

f) Com base em sua resposta no item “e”, quais transformações de energia ocorrem nesse caso?

APÊNDICE C – EXPECTATIVAS DE APRENDIZAGEM/ RESULTADOS ESPERADOS

Apresentamos, neste apêndice, as expectativas de aprendizagem, bem como, alguns critérios de avaliação que poderão ser utilizados pelo professor para auxiliá-lo em relação à aplicação da sequência didática com os estudantes.

Também dispomos alguns resultados práticos inerentes da aplicação do Produto Educacional (PE), conforme apresentado anteriormente. Caso haja alterações ou adaptações no PE, as respostas dos experimentos poderão ser diferentes das expostas aqui. Frisamos que os valores experimentais apresentados baseiam-se em uma mola helicoidal, apenas que possui as seguintes características: 1,5 cm de diâmetro e 15,0 cm de comprimento (em estado normal). A mola helicoidal utilizada está apresentada na Figura C.1.



Figura C.1: Imagem fotográfica da mola helicoidal utilizada para parâmetros dos resultados esperados. FONTE: o autor.

C.1.1 Roteiro experimental 01 (Exp. 01): Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - caso estático

Enumere as massas e meça a massa individual ou de cada conjunto (sugestão: iniciar com 60 g + suporte para massas). Se as massas são de valores não conhecidos, ou se utilizar um suporte cujo valor da massa não possa ser desprezado como a de um pedaço de fio de nylon. Para utilizar o fio de nylon ou algodão como suporte una-as conforme indicado na Figura 1 (c). Se necessário una duas massas pelo fio, formando 4 conjuntos de massas separados. Anote valores do conjunto

suspensão após realizar a aferição das mesmas em uma balança digital. Anote os dados das massas na Tabela C.1;

A massa do conjunto $m_{conjunto}$, geralmente é considerada levando-se em conta os 60g da massa somada à massa do suporte. Cabe ressaltar que a massa do suporte poderá ser desprezível, caso seja utilizada uma linha de nylon. Em molas mais rígidas é importante observar o uso de conjuntos com massas muito superiores ao sugerido pelo roteiro, visando resultados mais fáceis de serem interpretados.

Tabela C.1- Dados para determinação da constante elástica da mola - Massa (g) são os valores das massas individuais a ser colocada no suporte para pendurar na mola; m_T (g) é a massa total formada pelas massas individuais mais seu suporte; P a força peso e ΔL (cm) o deslocamento causada para cada conjunto de massas suspensas na mola. FONTE: o autor.

	Massa (g)	Massa Total m_T(g)	F (din) = $P = m_T \cdot g$	ΔL(cm)	$k = \frac{F}{\Delta L}$ (dinas/cm)
1	60	60	58800	8	7530
2	80	80	78400	11	7127,3
3	100	100	98000	14	7000
4	120	120	117600	17	6917,6
5	140	140	137200	20	6860
Constante elástica (k) da mola , pelo ajuste da reta					6533,3
Massa do Gancho: 0 g (desprezível).					

Ao usarmos a massa inicial de 60g e aumentando-a conforme consta na Tabela C.1, é necessário preencher as colunas e linhas dispostas para as cinco medidas. Para isso, é faz-se necessário:

- A coluna Massa Total m_T será a massa (medida em gramas), utilizada somada à massa do suporte caso tenha utilizado;*
- Considerando a aceleração gravitacional da Terra como $g = 980\text{cm/s}^2$, calcula-se a força peso, a qual considerou ser igual à força F . Nesse experimento, optamos por utilizar como unidade de medida da força o dina (dyn). Isso justifica-se ao fato de podermos apresentar aos estudantes novas maneiras de medir a força exercida por um corpo;*

- ΔL é a elongação sofrida pela mola de acordo com a inserção das diferentes massas na extremidade livre da mola helicoidal;
- A constante elástica k da mola helicoidal será determinada pela razão $k = \frac{F}{\Delta L}$, tendo como unidade de medida o dyn/cm (dina por centímetro).

Apresenta-se a seguir que para qualquer outro conjunto de massas também é possível fazer a mesma análise. Segue a Tabela 2 de dados cujo deslocamento foi obtido com valores diferentes aos sugeridos.

Tabela C.2 - Dados Experimentais para determinação da constante elástica da mola A: Massa (g) são os valores das massas individuais a ser colocada no suporte para pendurar na mola; m_T (g) é a massa total formada pelas massas individuais mais seu suporte; P a força peso para $g = 980 \text{ cm/s}^2$ e ΔL (cm) o deslocamento causada para cada conjunto de massas suspensas na mola. FONTE: o autor.

Medida	Massa Total (m_T (g))	F (dyn) = $P = m_T \cdot g$	ΔL (cm)	$k = \frac{F}{\Delta L}$ (dyn/cm)
1	50,1	49098	4,0	12275
2	99,8	97804	10,2	9589
3	149,4	146412	18,3	8001
4	200,8	196784	26,0	7569
5	300,7	294686	41,0	7188
Média aritmética da constante elástica (k) da mola (dyn/cm)				8.924,4

C.1.2 Questionário Avaliativo 01 (QPo1)

(A ser aplicado posteriormente a realização do Experimento 01 (Exp. 01))

a) O que aconteceu com os valores de ΔL , à medida que F aumentou?

Ao aumentarmos a força F com a inclusão de novas massas, a elongação da mola ΔL também aumenta. Conforme pode ser observado nos resultados das Tabelas C.1 e C.2.

b) Confeccione numa folha de papel milimetrado (Figura 1) o gráfico de F em função de ΔL .

Espera-se que o gráfico obtido pelo estudante seja similar ao de uma função de 1º grau, do tipo $f(x) = a + b x$, tal que o gráfico $f \times x$, tem como comportamento uma reta não perpendicular ao eixo das abscissas (x), conforme apresentado na Figura C.2.

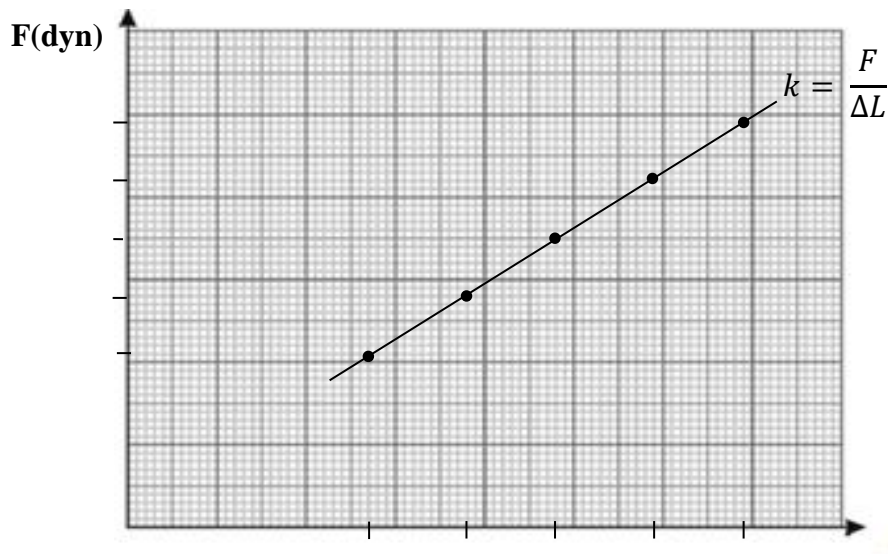


Figura C.2 - Gráfico em papel milimetrado da força (F) em dina versus a variação de distensão da mola (ΔL) medida em centímetros (cm), confeccionado com os dados da Tabela C.1. O módulo de escala utilizado foi: $Me_F = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{mm/dyn}$, e $Me_{\Delta L} = 3,5 \frac{\text{mm}}{\text{cm}}$. Como os pontos são os esperados teoricamente a equação da reta ajustada pelo método dos mínimos quadrados é dada por: $F = 6533,33 + 6533,33 \Delta L$. FONTE: o autor.

Utilizando-se o Microsoft Excel 2010®, obtém-se, para a mola em questão, os coeficientes, angular e linear, conforme apresentados no gráfico da Figura C.3.

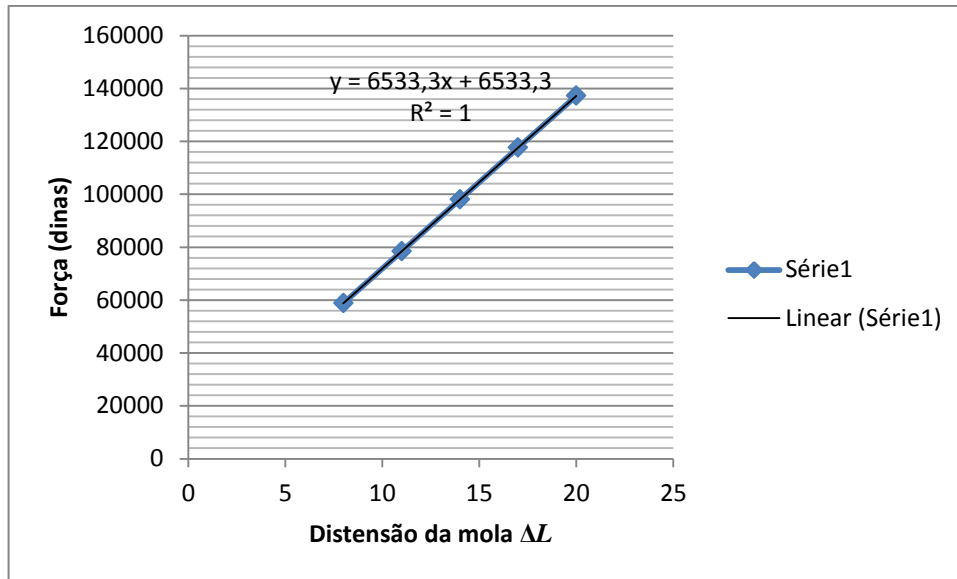


Figura C.3 - Gráfico confeccionado com os dados da Tabela C.1, no Microsoft Excel 2010® como os valores dos coeficientes angular e linear: $F = 6533 \Delta L + 6533$, para mola helicoidal de 1,5 cm de diâmetro e 15 cm de comprimento. O gráfico da Figura contém a relação entre a força (F) em dina versus a variação de distensão da mola (ΔL) medida em centímetros (cm), após a inserção de diferentes massas na extremidade livre da mola.

Para o caso da Tabela C.2, teremos o gráfico da Figura C.4. Confeccionada no Microsoft Excel 2010®.

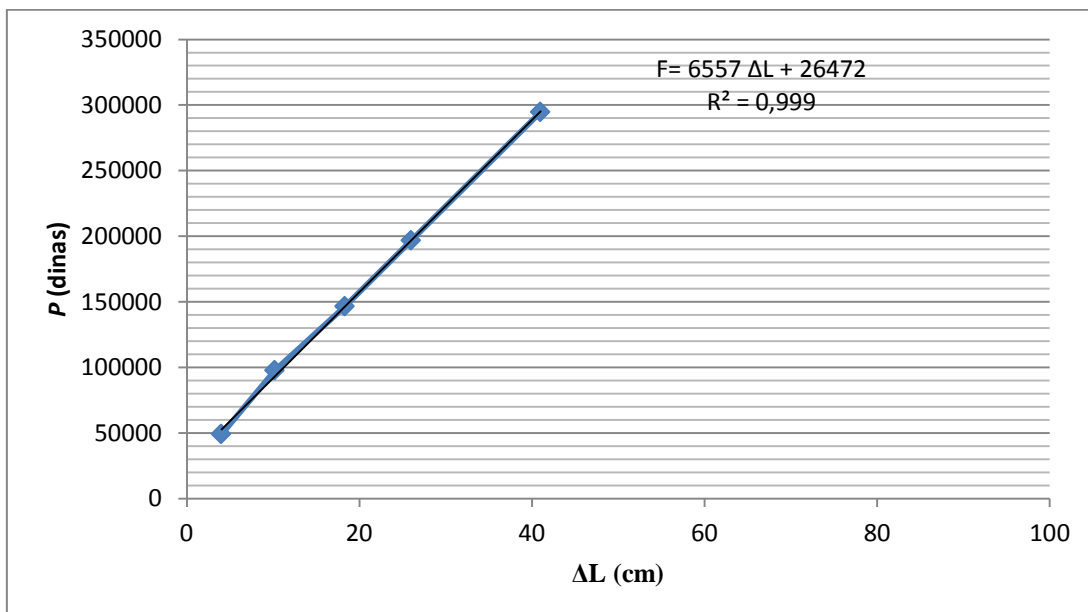


Figura C.4 - Gráfico força (F) em dina versus a variação de distensão da mola (ΔL) medida em centímetros (cm), confeccionado com os dados da Tabela C.2 no Microsoft Excel 2010®. Como os pontos são os esperados teoricamente a equação da reta ajustada pelo método dos mínimos quadrados é dada por: $F = 26472 + 6557 \Delta L$. FONTE: o autor.

Devido ao ajuste da reta o resultado $k_{din} = 6.557 \text{ dyn/cm}$ foi bem mais próximo do teórico ($k_{teórico} = 6.533,3 \text{ dyn/cm}$) com relação ao $k_{médio} = 8.924,4 \text{ dyn/cm}$ referente à Tabela C.2, em que se pode ver que o primeiro valor está bem fora do esperado.

c) Qual é a relação existente entre F e ΔL ?

O ideal é que o estudante faça uma relação de proporcionalidade, ou seja, a medida que aumentamos a força F aumenta-se a elongação da mola ΔL . A relação é linear.

d) Sendo uma relação linear entre F e ΔL , trace uma reta média entre os pontos experimentais obtidos e determine o coeficiente angular dessa reta com suas respectivas unidades.

Considerando cinco pontos no gráfico, a reta média entre os pontos experimentais dar-se-á por meio da Figura C.5:

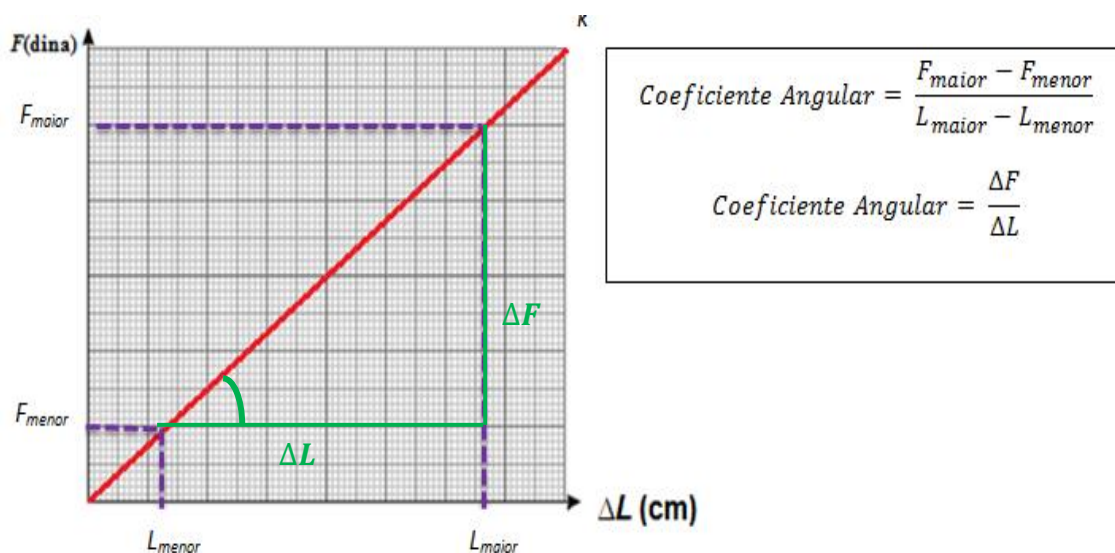


Figura C.5 – Esboço de como obter o coeficiente angular de um gráfico em papel milimetrado da força (F) em dina versus a variação de distensão da mola (ΔL) medida em centímetros (cm). Apresenta-se ainda, uma forma de como calcular o coeficiente angular da reta tangencial $\frac{\Delta F}{\Delta L}$. FONTE: o autor.

Utilizando-se o Microsoft Excel 2010®, obtêm-se para a mola em questão, os coeficientes, angular (6533 dyn/cm) e linear (6533 dyn), conforme apresentados

no gráfico da Figura C.3. Fornecido pela equação de ajuste de reta: $y = 6533 x + 6533$, sendo $y = F$ e $x = \Delta L$, e $R^2 = 1$ significa que o gráfico é uma reta perfeita sem desvios. O coeficiente linear indica que havia uma massa de aproximadamente 7 g inicialmente.

- d) Sendo uma relação linear entre F e ΔL , trace uma reta média entre os pontos experimentais obtidos e determine o coeficiente linear dessa reta.

Os coeficientes, linear e angular, poderão ser determinados por meio de um sistema de equações, uma vez que a reta tangencial representa uma função afim: $y = ax + b$. Ou por meio da leitura no próprio gráfico, o coeficiente linear é o ponto onde a reta cruza o eixo das ordenadas no caso da força, e o coeficiente angular a inclinação da reta tangente a reta traçada.

- f) Qual é o significado físico dos coeficientes angular e linear obtidos nos itens “d” e “e”?

Sabendo-se que a função afim é dada por $y = ax + b$, onde a é o coeficiente angular e b o coeficiente linear e que a Lei de Hooke é dada por $F = k\Delta L$, em que F é a força, k é a constante elástica da mola e ΔL a elongação sofrida pela mola, espera-se que os estudantes realizem as seguintes relações em ambas as equações apresentada, teoricamente:

- $y = F$;
- $a = k$;
- $x = \Delta L$;
- $b = 0$, nesse caso representa a força peso inicial atuante no sistema massa-mola.

- g) A mola ultrapassou o limite de elasticidade? O que seria esse limite de elasticidade?

É aconselhável que nenhuma mola ultrapasse o seu limite de elasticidade, pois para esses casos, a Lei de Hooke não poderia ser considerada como válida, visto que a mola não retorna a sua posição natural, ocorrendo uma deformação do tipo plástica, inutilizando a mola.

Entende-se que limite de elasticidade é a tensão máxima que um material pode suportar sem sofrer elongações (deformações) permanentes. Em outras palavras, a mola não retorna mais a sua forma natural.

h) Os resultados obtidos comprovam a lei de Hooke? Em caso afirmativo, enuncie a lei.

Sim, é possível observar a validade da Lei de Hooke. Isso pode ser obtido por meio de uma correta interpretação dos dados e a utilização de ferramentas que auxiliem na elaboração do gráfico, tais como, papel milimetrado e o Microsoft Excel como editor de gráficos, além do correto manuseio dos materiais e roteiro experimentais os resultados obtidos.

Isso pode ser observado, pelo fato de ter ajustado a reta no gráfico da Figura C.5. Isso diminui o desvio entre a média obtida na Tabela C.1 (ou Gráfico da Figura C.4) que são os resultados que deveria se ter obtido ($k=6533 \text{ dyn/cm}$) e o da Tabela C.2 que são realmente experimentais ($k=6557 \text{ dyn/cm}$). Um desvio de 0,4%.

A Lei de Hooke é uma lei física que estabelece a elongação ou contração sofrida por um corpo deformável elasticamente, neste caso, um corpo elástico por meio da aplicação de uma força. De acordo com a teoria, a distensão (deformação elástica) (ΔL) de uma mola helicoidal, por exemplo, é diretamente proporcional à força aplicada (F) sobre ele. Além da força aplicada, deve-se levar em consideração a rigidez da mola ou do corpo elástico por meio de uma constante denominada constante elástica da mola, representada por k . Dessa forma, tem-se $F = -k\Delta L$.

C.2 ETAPA 2

C.2.1 Roteiro experimental 02 (Exp. 02) - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal - caso dinâmico.

Medir a massa do conjunto (massa + suporte para massas).

A massa do conjunto m_{conjunto} , geralmente é considerada levando-se em conta os 60g da massa somada à massa do suporte, ou seja, tudo o que está suspenso na mola. Em molas mais rígidas (referindo-se ao material) é importante observar o uso de conjuntos com massas superiores ao sugerido pelo roteiro, visando resultados mais fáceis de serem observados e medir o tempo de oscilação.

Em molas de comprimentos menores, deve-se cuidar com a quantidade de massa a ser suspensa, para que não ocorra deformação plástica. A melhor forma é colocar uma quantidade e observar a oscilação e teste da medida do tempo.

Outro ponto a ser observado para a obtenção de resultados mais próximos dos encontrados nas teorias é necessário verificar se a massa acoplada na extremidade livre da mola é suficiente para oscilar sem a formação de um movimento pendular.

Tabela C.3: Tempos medidos para três oscilações, para a massa de 90 g suspensa, repetindo-se dez vezes o processo.

Processo (medida)	Tempo determinado (s)	Período médio de três períodos
01	3,39	1,13
02	3,78	1,26
03	4,17	1,39
04	3,44	1,15
05	3,87	1,29
06	3,45	1,15
07	3,56	1,19
08	3,85	1,28
09	3,76	1,25
10	3,79	1,26

	Tempo de 01 Período (T_m (s))	1,24
--	---	-------------

É sugerida a medida de três oscilações. Dependendo da rigidez da mola helicoidal utilizada poderão ser adaptadas mais oscilações. Não é aconselhável menos oscilações, pois interferem em resultados próximos do esperado. É importante frisar que o objetivo dessa etapa é a obtenção de uma constante elástica k com valor próximo ao encontrado na Etapa 1.

Outro fator importante a ser levado em consideração é o tempo. Utiliza-se duas casas decimais visando a obtenção de um período T mais preciso. Para a determinação mais precisa do período de oscilação da mola helicoidal, faz-se importante observação o movimento de "sobe e desce" da mola sempre em linha vertical, evitando-se ou desconsiderando-se movimentos pendulares.

Aumentando a massa suspensa para $m= 200,3$ g, obteve-se os dados da Tabela C.4, para o tempo de 3 oscilações completas.

Tabela C.4: Tempos medidos para três oscilações, para a massa de 200,3 g suspensa, repetindo-se dez vezes o processo.

Processo (medida)	Tempo determinado (s)	Período médio de três períodos
01	3,29	1,10
02	3,31	1,10
03	3,22	1,07
04	3,35	1,12
05	3,28	1,09
06	3,28	1,09
07	3,19	1,06
08	3,19	1,06
09	3,28	1,09
10	3,25	1,08
	Tempo de 01 Período (T_m (s))	1,09

C.2.2 Questionário Avaliativo 02 (QPo2)

(A ser aplicado após a realização do Experimento 02 (Exp. 02))

a) Determine a constante elástica, utilizando-se do processo dinâmico (lembrando-se que se trata de movimento oscilatório).

Utilizando a Equação:

$$k_{\text{dinâmico}} = \frac{4\pi^2 m}{T^2}. \quad [\text{C. 1}]$$

Em que: m é a massa do conjunto (massa + massa do suporte) e T é o período determinado experimentalmente.

Para a mola da Figura C.1, e massa suspensa de 90 g, o valor da constante elástica k

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T_m^2} = \frac{4 (3,14)^2 (90)}{(1,24)^2} = 2308 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}}.$$

possui um desvio padrão 64%. Isto quer dizer que os valores de k diferiram, devido a dificuldade em aferir o tempo de três oscilações. Aumentando a massa suspensa para m= 200,3 g, o resultado foi melhor, quando comparado com o resultado do caso estático.

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T_m^2} = \frac{4 (3,14)^2 (200,3)}{(1,09)^2} = 3324 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}}.$$

$$D = \left| \frac{6533 - 3324}{6533} \right| 100\% = 49\%$$

Diminuindo a imprecisão, de seu valor teórico.

Para a massa de 90 g o período adequado deveria ser de: 0,74 s, e para a massa de 200,3 g de 1,10 s.

Portanto, o fato de trabalhar com o processo dinâmico não invalida o processo, só tem que tomar bastante cuidado ao aferir os dados do tempo, principalmente pelo mesmo estar ao quadrado.

b) O valor de k obtido foi o mesmo em relação ao que o grupo conseguiu no processo estático?

O ideal é que o grupo obtenha uma constante elástica k com valor próximo ao obtido na Etapa 1 (método estático). Mas, caso não se obtenha discutir os resultados.

c) A mola ultrapassou o limite de elasticidade? O que seria esse limite de elasticidade?

Não, e é aconselhável que nenhuma mola ultrapasse o seu limite de elasticidade, pois para esses casos, a Lei de Hooke não poderia ser considerada como válida.

Entende-se que limite de elasticidade é a tensão máxima que um material pode suportar sem sofrer elongações (deformações) permanentes. As denominadas deformações plásticas.

d) Os resultados obtidos comprovam a lei de Hooke? Como pode afirmar isso?

Sim, pois os resultados foram obtidos por métodos que foram obtidos teoricamente por considerações físicas.

Experimentalmente o caso estático fornece um valor mais próximo do teórico em relação ao dinâmico. Esse fato ocorre pelo caso dinâmico depender do tempo de oscilação, e esse ser uma medida mais imprecisa do que uma medida de algo estático e ainda estar ao quadrado propagando o erro. O ideal é usar uma massa que permita uma aferição do período mais próximo do teórico, dessa forma terá uma constante elástica mais próxima do teórico.

e) Quais foram as dificuldades e facilidades que você pode apontar na realização deste experimento?

O ponto de maior dificuldade é na aferição do tempo de forma precisa.

É de extrema valia verificar as dificuldades e facilidades do estudante em relação à realização de qualquer experimento, uma vez que esse método funciona como uma autoavaliação do mesmo.

C.3 ETAPA 3

C.3.1 Roteiro experimental 03 (Exp. 03) - Determinação da constante elástica de uma mola helicoidal utilizando a associação de molas em série e em paralelo.

Configuração em série:

Faz-se necessário o conhecimento das constantes elásticas k_1 e k_2 que podem ser obtidos nas Etapas 1 e 2.

Determinar a constante elástica da série k_s , utilizando a Equação [C.2]:

$$\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{1}{k_s} \quad [\text{C. 2}]$$

Escolher uma massa aferida e anotar sua massa: $m_2 = 90\text{g}$ (sugestão):

$$k_s = \frac{6533,3}{2} = 3266,65 \text{ dyn/cm},$$

visto que as molas são iguais, e cada uma de constante elástica igual a 6533,3 dyn/cm.

Os dados apresentados na Tabela C.4 são referentes ao experimento para as mesmas massas da Tabela C.2 para a situação estática e para a massa de 200,3 g para a situação dinâmica.

Tabela C.4 – Configuração em série. Dados (a) parte estática do deslocamento para cada conjunto de massas suspensas e (b) parte dinâmica: tempo total (t) em segundos, de 3 períodos de oscilações determinados na associação em série de duas molas helicoidais. Em que a massa é uma massa m suspensa de valor fixo em gramas, Período médio do tempo de 3 oscilações e a média das 5 repetições. FONTE: o autor.

Estático				Dinâmico			
Massa(g)	$\Delta L(cm)$	Peso (dinas)	$k(\frac{dinas}{cm})$	Massa (g)	Medida	Tempo total (t) de 3 oscilações completas em segundos	Período de oscilação (s) $T = \frac{t}{3}$
50,1	11,0	49098	4464	200,3	1	4,69	1,56
99,8	26,0	97804	3762		2	4,50	1,50
149,4	41,0	146412	3571		3	4,50	1,50
200,8	57,0	196784	3452		4	4,56	1,52
300,7	88,0	294686	3349		5	4,69	1,56
						$T_{médio}(s)$	1,53
$k(\frac{dinas}{cm})$			3.719,6			$k_{din}(\frac{dinas}{cm})$	3.375

Configuração em Paralelo:

Determinar a constante elástica da associação em paralelo, utilizando a Equação [C.3]:

$$k_p = k_1 + k_2 \quad [C.3]$$

Faz-se necessário o conhecimento das constantes elásticas k_1 e k_2 que podem ser obtidos nas Etapas 1 e 2. No caso da mola da Figura C.1:

$$k_p = k_1 + k_2 = 2(6.533,3) = 13.066,6 \text{ dyn/cm}$$

A seguir, apresentam-se na Tabela C.5 os dados aferidos para a parte dinâmica para duas molas iguais associadas paralelamente, como opção, sem a parte estática.

Dados das massas referentes a Tabela C.2 para o caso estático e de 200,3 g para o caso dinâmico, são os apresentados na Tabela C.5.

Tabela C.5 - Períodos de oscilações determinados na associação em paralelo de duas molas helicoidais. Dados (a) parte estática do deslocamento para cada conjunto de massas suspensas e (b) parte dinâmica: tempo total (t) em segundos, de 3 períodos de oscilações determinados na associação em série de duas molas helicoidais. Em que a massa é uma massa m suspensa de valor fixo em gramas, Período médio do tempo de 3 oscilações e a média das 5 repetições. FONTE: o autor.

Estático				Dinâmico			
Massa(g)	$\Delta L(cm)$	Peso (dinas)	k(dyn/cm)	Massa (g)	Medida	Tempo total (t) de 3 oscilações completas em segundos	Período de oscilação (s) $T = \frac{t}{3}$
50,1	1,0	49098	49098	200,3	1	2,22	0,74
99,8	5,0	97804	19561		2	2,25	0,75
149,4	9,0	146412	16268		3	2,22	0,74
200,8	12,0	196784	16399		4	2,22	0,74
300,7	20,0	294686	14734		5	2,25	0,75
						$T_{\text{médio}}(s)$	0,74
			23.212			$k_{\text{din}} (dyn/cm)$	14.426

União dos dados dos Experimentos 1, 2 e 3:

Completar a Tabela 5 a partir da repetição dos procedimentos listados. Da parte 1, 2 e 3 estática.

Tabela C.6 – Dados da parte estática dos experimentos 1, 2 e 3 para os dados das massas da Tabela C.2.

		1 mola	Molas em série	Molas em paralelo
Massa (g)	Força Peso (dinas)	$\Delta L (cm)$	$\Delta L (cm)$	$\Delta L (cm)$
50,1	49098	4,0	11,0	1,0
99,8	97804	10,2	26,0	5,0
149,4	146412	18,3	41,0	9,0
200,8	196784	26,0	57,0	12,0

Parte dinâmica:

Do Exp. 02, anote o dado da constante elástica obtida para 1 mola na Tabela C.7. E, faça o mesmo com os resultados da constante dinâmica obtida experimentalmente por meio da Equação: $k_{\text{din.}} = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$, do Exp. 03 - parte dinâmica,.

Tabela C.7 –Dados da constante elástica para o caso dinâmico referente as Tabelas: 2.2, 2.3 e 2.4, obtidos da realização dos Experimentos 02 e 03 para uma mola, duas molas iguais em série e as mesmas molas em paralelo. A constante elástica da mola de 15,0 cm e 1,5 cm de diâmetro é dada por 6.533,3 dyn/cm. E o desvio percentual D(%) Fonte: o autor.

	Massa (g) utilizada	01 mola – Experimento 02	Associação em série	Associação em paralelo
$k_{\text{dinâmico}} \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}}\right)$	200,3	3.324	3.375	14.426
$k_s \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}}\right)$			3.268	
$k_p \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}}\right)$				13.067
D(%)		49	3	10

C.3.2 Questionário Avaliativo 03 (QP03)

(A ser aplicado após a realização do Experimento 03)

a) Calcular o valor da constante elástica (experimental) da associação em série.

Utilizar: $\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{1}{k_s}$, onde k_s é a constante elástica da associação em

série. No caso da mola da Figura C1: 3.267 dyn/cm

b) Calcular o valor da constante elástica (experimental) da associação em paralelo.

Utilizar: $k_p = k_1 + k_2$, onde k_p é a constante elástica da associação em paralelo. Para a mola da Figura C.1: 13.067 dyn/cm.

c) Destacar as principais diferenças entre a associação de molas helicoidais em série e em paralelo.

Espera-se que os estudantes verifiquem que ao associarmos molas em série, a força ($\vec{F}_{ext} = \vec{P}$) que atua sobre cada uma das molas acopladas, bem como as respectivas elongações sofridas, y_1 e y_2 , sejam independentes; e, que, quando duas ou mais molas helicoidais, de mesmo comprimento, estão associadas em paralelo, estas dividem a força aplicada de forma igual.

- d) Confeccionar o gráfico que relaciona a força peso da associação em série versus o deslocamento, de preferência em papel milimetrado (Figura C.5) ou por meio de algum software gráfico como o Microsoft Excel®. Para isso utilize os dados da Tabela C.4 referente ao Exp. 03 – série.

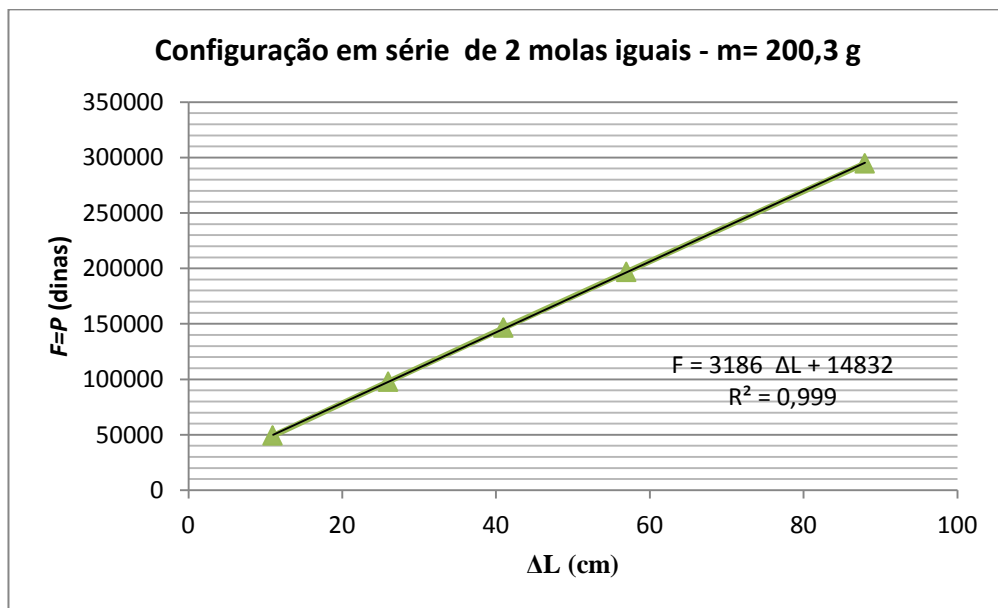


Figura C.5 – Gráfico da força peso (F=P) em dynas (dyn) versus o deslocamento ΔL em centímetros (cm), confeccionado com os dados da Tabela C.4, parte estática da configuração em série de duas molas iguais. A reta ajustada é dada por: $F = 3186\Delta L + 14832$, e $R^2 = 0,999$ indica o quanto é linear.

- e) Confeccionar o gráfico que relaciona a força peso da associação em paralelo versus o deslocamento, de preferência em papel milimetrado (Figura C.6) ou no Microsoft Excel. Para isso utilizou-se os dados da Tabela C.5 referente ao Exp. 03 – paralelo.

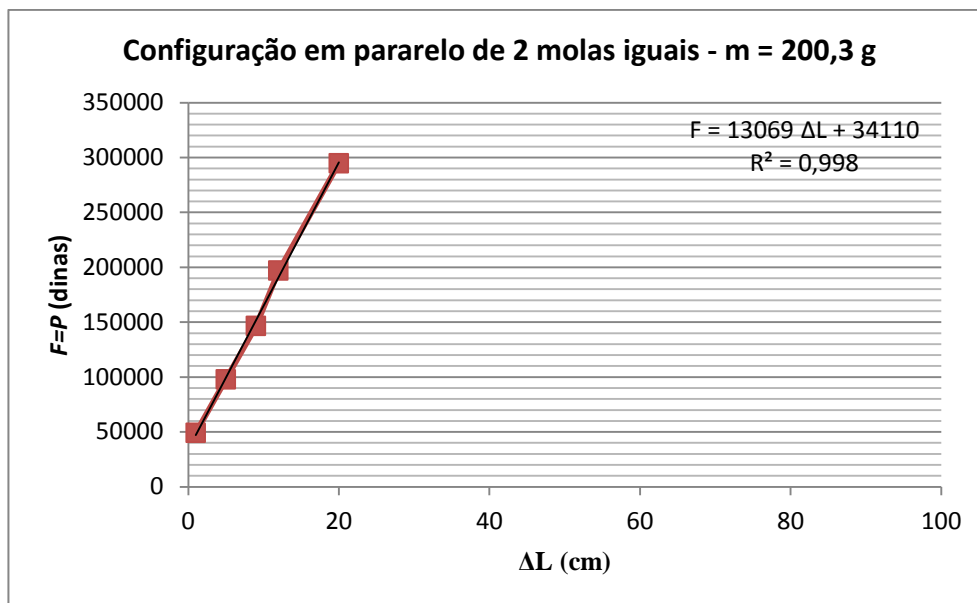


Figura C.6 – Gráfico da força peso ($F=P$) em dynas (dyn) versus o deslocamento ΔL em centímetros (cm), confeccionado com os dados da Tabela C.5, parte estática da configuração em paralelo de duas molas iguais. A reta ajustada é dada por: $F = 13069 \Delta L + 34110$, e $R^2 = 0,998$ indica o quanto é linear.

- f) A partir da confecção dos gráficos, indicar o valor numérico dos quocientes de uma única mola e de ambas as associações que correspondem à inclinação dos gráficos. E, compare os resultados quando obtidos por meio das equações, complete a Tabela C.6.

Tabela C.7 - Valores das constantes elásticas obtidas por meio das Equações e considerando a média dos valores e por meio da inclinação das retas dos gráficos. E, o cálculo do desvio percentual em relação os valores mais próximos.

	Caso estático			Caso Dinâmico		
	1 mola	Molas em série	Molas em Paralelo	1 mola	Molas em série	Molas em Paralelo
	k_1 (dyn/cm)	k_s (dyn/cm)	k_p (dyn/cm)	k_1 (dyn/cm)	k_s (dyn/cm)	k_p (dyn/cm)
Equação/Teoria	6.533,3	3.266,65	13.066,6	6.533,3	3.266,65	13.066,6
Equação/Média	8.924,4	3.719,6	23.212	3.324	3.375	14.426
Gráfico (reta ajustada)	6.557	3.187	13.069			
D% (%)	4	14	0,02	49	3	10

Sugestão:

- a) Confeccionar os três gráficos da parte estática para a mesma massa, em uma única figura e analisar a inclinação das retas.

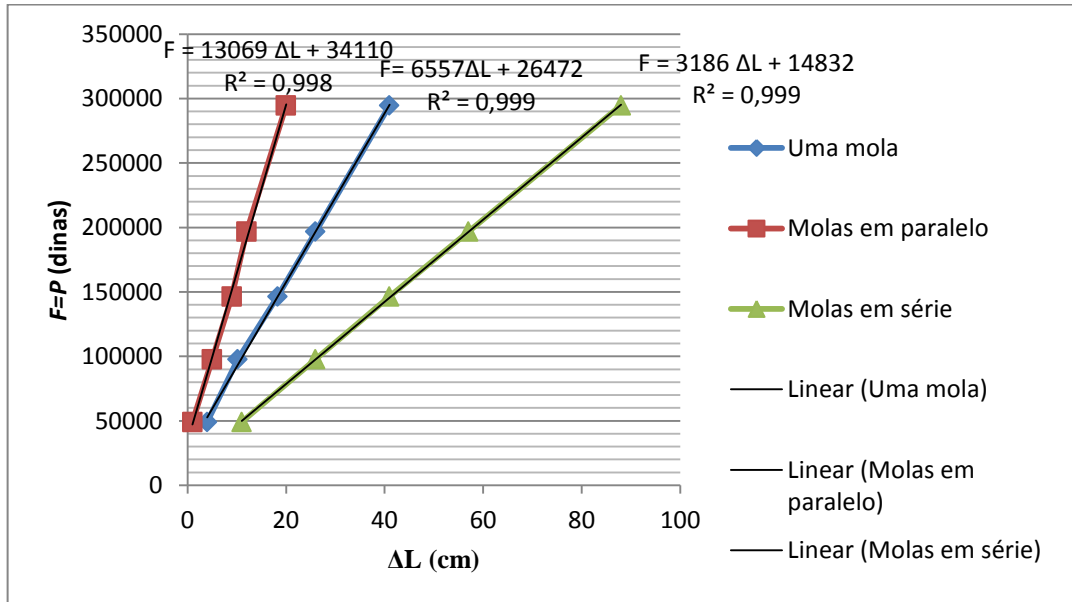


Figura C.7 – Gráficos da Força (F) igual a força peso em dinas (dyn) versus deslocamento (ΔL) em centímetros (cm), confeccionado com os dados das Tabelas C.2, C.3, e C.4 parte estática.

Analisando as constantes elásticas obtidas experimentalmente para a massa de 200,3 g, no caso estático:

$$k_1 = 6557 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}}$$

$$k_p = 13.069 \text{ dyn/cm}$$

$$k_s = 3186 \text{ dyn/cm}$$

A proporção entre as constantes elásticas:

$$\frac{k_1}{k_p} = 0,5, \quad e \quad \frac{k_1}{k_s} = 2,1. \text{ Portanto, } k_p = 2 k_1 \text{ e } k_s = \frac{k_1}{2}, \text{ como esperado}$$

teoricamente.

- 1) Comparar os períodos do movimento oscilatório.

Tabela C.8 – Dados dos períodos médios para cada, sistema massa mola: mola de 15,0 cm e diâmetro de 1,5 cm e massa de 200,3 g. Extraídos das Tabelas C.4; C.5 e C.6. Fonte: o autor.

Configuração	Período médio: T_m (s)	
1 mola	T_1 (s)	1,09
Molas série	T_s (s)	1,53
Molas paralelo	T_p (s)	0,74

De acordo com as leis do Movimento Harmônico Simples (MHS) pode-se afirmar que: $T_p > T_1 > T_s$, ou seja: o período da associação de duas molas em paralelo T_p de mesma constante elástica é maior que o período de uma mola única T_m , que por sua vez é maior que o período de uma associação em série T_s de duas molas helicoidais.

e) Relate as principais dificuldades encontradas na realização do experimento.

As dificuldades encontradas normalmente são em relação à leitura e compreensão do texto, para a montagem e execução experimental.

Considerar que cada etapa deve ser realizada com atenção para se obter bons dados.

Aprender a manusear os instrumentos de medida, também pode ser uma dificuldade quando não se conhece o funcionamento do mesmo. O que pode ser sanado fazendo alguns testes de adaptação.

Observar a influência de termos lineares e quadráticos nas equações que influenciam nos resultados, como a constante elástica no caso estático ser diretamente proporcional ao deslocamento (linear) e no caso dinâmico ser inversamente proporcional ao período médio ao quadrado. Como o tempo é uma medida imprecisa, deve-se fazer testes para se ter menos chances de errar na tomada de tempo, pois ainda será elevada ao quadrado, o que propaga o erro.

Em relação a interpretação dos resultados, confeccionar gráficos em papel milimetrado ou em algum programa computacional e interpretá-los pode ser um ponto de dificuldade.

f) Relate também as suas considerações favoráveis em relação ao experimento.

Aprender a teoria por meio de um experimento, sem decorar, mas compreendendo o evento da qual se calcula, e que existem diversas formas a ser abordar para obter o mesmo resultado deve ser algo motivador.

Observar que em cada experimento pode-se abordar vários conteúdos que envolvem a física, como Lei de Hooke, Leis de Newton, Conservação de Energia e as energia nela envolvidas, Movimento Harmônico Simples, Movimento Harmônico Amortecido, me parece algo bem interessante.

Portanto, é de extrema valia verificar as dificuldades e facilidades do estudante em relação à realização de qualquer experimento, uma vez que esse método funciona como uma autoavaliação do mesmo.

C.4 ETAPA 4

C.4.1 Roteiro experimental 04 (Exp. 04) - Conservação da Energia em materiais deformáveis - o curioso caso da “lata energética” a partir do armazenamento de energia mecânica.

Após seguir os procedimentos presentes no Roteiro Experimento 04, gire os palitos das extremidades da “lata energética” e coloque-o sobre uma superfície plana. Solte-o e veja que a “lata energética” precisa realizar um movimento de “vai e vem”, demonstrando o armazenamento de energia, bem como, a conversão de diferentes tipos de energia, no caso: energia elástica em energia potencial no caso do movimento no plano e energia potencial gravitacional e elástica em energia cinética no caso da rampa.

C.4.2 Questionário Avaliativo 04 (QPo4)

(A ser aplicado após a realização do Experimento 04 (Exp4))

a) Qual a função, da lata/recipiente, do elástico e do parafuso com a porca?

Para fazer com que a lata se movimente, o elástico e o parafuso funcionam como uma espécie de motor.

b) Que tipos de transformação de energia estão envolvidos no comportamento da lata/recipiente nas duas situações (quando rodada na superfície horizontal e quando colocada na rampa)?

Espera-se que os estudantes definam e diferenciem energia cinética, energia potencial elástica e energia potencial gravitacional.

c) Que modificações você propõe para que a lata/recipiente atinja maior alcance ao ser rodada na superfície horizontal?

Espera-se que os estudantes respondam esta questão propondo a troca do parafuso utilizado por um de maior massa ou a utilização de um elástico mais resistente.

d) É possível substituir o elástico retorcido por uma mola helicoidal? O sistema funcionaria da mesma forma?

É possível sim realizar a troca. Ambos os materiais são deformáveis e funcionam como "motor" da lata quando torcidos. Portanto, o sistema funcionaria da mesma forma.

e) Indique uma maneira de fazer a lata/recipiente rolar sem um impulso inicial. Descreva esse processo.

Espera-se que os estudantes se atentem ao fato da energia poder ser armazenada pela torção do elástico presente na lata. Esse mecanismo é parecido com o utilizado em brinquedo de corda.

f) Com base em sua resposta no item “e”, quais transformações de energia ocorrem nesse caso?

Transformação de energia potencial elástica em energia cinética.