



UFC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

HUDSON AGUIAR DE SOUZA

**UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA ENVOLVENDO LEIS DE NEWTON E LEI DE
HOOKE À LUZ DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA**

FORTALEZA

2025

HUDSON AGUIAR DE SOUZA

UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA ENVOLVENDO LEIS DE NEWTON E LEI DE HOOKE
À LUZ DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Dissertação apresentada ao Polo 43 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Nildo Loiola Dias.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S238s Souza, Hudson Aguiar de.
Uma sequência didática envolvendo leis de Newton e lei de Hooke à luz da aprendizagem significativa / Hudson Aguiar de Souza. – 2025.
121 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Nildo Loiola Dias.
1. ensino de física. 2. leis de Newton. 3. lei de Hooke. 4. aprendizagem significativa. 5. experimentação.
I. Título.

CDD 530.07

HUDSON AGUIAR DE SOUZA

UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA ENVOLVENDO LEIS DE NEWTON E LEI DE HOOKE
À LUZ DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Dissertação apresentada ao Polo 43 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Ensino de Física.

Aprovada em: 24/10/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nildo Loiola Dias (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Joao Guilherme Nogueira Matias
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Mairton Cavalcante Romeu
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Dedico este trabalho aos meus pais e, em especial, à minha avó, que me criou com muito amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de realizar este trabalho.

Reconheço que a conclusão deste trabalho é fruto de minha força de vontade e determinação.

À minha família, pelo apoio constante em meus estudos.

Aos meus amigos, por enxergarem meu potencial para alcançar um título de mestre.

Ao Prof. Dr. Nildo Loiola Dias, pelo inestimável apoio e disposição para ajudar na implementação do produto educacional deste trabalho.

À Escola Canadense Maple Bear, pela concessão da oportunidade de implementar este produto educacional com os alunos do High School.

Aos colegas do Mestrado Nacional em Ensino de Física, que tornaram esta experiência acadêmica inesquecível.

Especialmente, à Leiliane dos Santos de Araujo, por sempre acreditar em mim, mesmo nos momentos em que eu não acreditava.

Especialmente, ao Rodrigo Cesar Ferreira de Paiva, por ser um amigo para todas as horas.

Especialmente, à minha avó, Francisca Neves Aguiar Silva, por seu amor incondicional todos os dias.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

O ensino das leis de Newton e da lei de Hooke ainda apresenta desafios relacionados à abstração teórica e à dificuldade de contextualização pelos alunos. Este trabalho investiga a aplicação de uma sequência didática essencialmente baseada no uso de caixas de papelão, blocos de madeira e elásticos, fundamenta-se na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, com o objetivo de tornar o ensino mais acessível e interativo para os alunos. O produto educacional desenvolvido foi aplicado em turmas do ensino médio da Escola Canadense Maple Bear. Sua estruturação segue três etapas: aplicação de um questionário diagnóstico para identificar conhecimentos prévios, realização de experimentos didáticos para explorar os conceitos físicos envolvidos e reaplicação do questionário para avaliar a evolução da aprendizagem. Durante a aplicação, os estudantes participaram ativamente das atividades experimentais, relacionando teoria e prática. A análise qualitativa e quantitativa dos dados demonstrou que a experimentação com materiais acessíveis favoreceu a compreensão dos conceitos e das equações, aumentando o engajamento dos alunos e promovendo um aprendizado mais significativo. Além disso, a abordagem adotada mostrou-se alinhada às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para o ensino de Ciências da Natureza. Os resultados indicam que a experimentação e a participação ativa dos estudantes são alternativas eficazes ao ensino tradicional. Dessa forma, esta dissertação apresenta uma proposta didática replicável, que pode ser utilizada por professores de Física na educação básica para tornar o ensino das leis de Newton e da lei de Hooke mais dinâmico e contextualizado.

Palavras-chave: ensino de física; leis de Newton; lei de Hooke; aprendizagem significativa; experimentação.

ABSTRACT

The teaching of Newton's laws and Hooke's law still presents challenges related to theoretical abstraction and the difficulty of contextualization by students. This work investigates the application of a didactic sequence based essentially on the use of cardboard boxes, wooden blocks, and elastic bands. It is grounded in Ausubel's Theory of Meaningful Learning, with the objective of making teaching more accessible and interactive for students. The developed educational product was applied in high school classes at the Maple Bear Canadian School. Its structure follows three stages: the application of a diagnostic questionnaire to identify prior knowledge, the carrying out of didactic experiments to explore the physical concepts involved, and the reapplication of the questionnaire to evaluate the evolution of learning. During the application, students actively participated in the experimental activities, relating theory and practice. The qualitative and quantitative analysis of the data demonstrated that experimentation with accessible materials favored the comprehension of the concepts and equations, increasing student engagement and promoting a more meaningful learning experience. Furthermore, the adopted approach proved to be aligned with the guidelines of the Base Nacional Comum Curricular (BNCC) for the teaching of Natural Sciences. The results indicate that experimentation and active student participation are effective alternatives to traditional teaching. Thus, this dissertation presents a replicable didactic proposal that can be used by Physics teachers in basic education to make the teaching of Newton's laws and Hooke's law more dynamic and contextualized.

Keywords: physics teaching; Newton's laws; Hooke's law; meaningful learning; experimentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pintura de Isaac Newton.....	26
Figura 2 – Diversas forças atuando sobre um corpo.	27
Figura 3 – Efeito da inércia em passageiros de um ônibus. À esquerda, o veículo e os passageiros estão em repouso. À direita, quando o ônibus inicia um movimento acelerado, os passageiros tendem a manter seu estado de movimento anterior (o repouso).	28
Figura 4 – Astronautas Jeffrey Hoffman e Story Musgrave instalando uma câmera planetária no telescópio espacial hubble.	29
Figura 5 – Força aplicada sobre um corpo	31
Figura 6 – Efeito cinemático de um newton sobre um corpo de um quilograma.....	32
Figura 7 – Par de forças numa caminhada.....	32
Figura 8 – Colisão entre dois móveis que estão na mesma direção mas em sentidos opostos.	33
Figura 9 – Par de forças na remada em um barco.	34
Figura 10 – Par de forças no balão com ar.	34
Figura 11 – Latitudes em que a gravidade assume o mesmo valor.	35
Figura 12 – Corpo de massa m , situado a uma altura h em relação à superfície do corpo de massa M e raio R , sujeito a uma força de atração gravitacional F	36
Figura 13 – Acelerações gravitacionais em grandes altitudes.	37
Figura 14 – Diferentes pesos e diferentes massas.	38
Figura 15 – Força peso e força normal atuando sobre uma caixa com areia que repousa sobre uma superfície horizontal.	39
Figura 16 – Comportamento da força elástica com a deformação da mola.	40
Figura 17 – Escultura de Robert Hooke.	41
Figura 18 – Mola sendo distendida por uma força externa.	42
Figura 19 – Gráfico de força externa em função da deformação da mola.....	42
Figura 20 – Duas molas associadas em série sujeitas a uma mesma força externa.....	44
Figura 21 – Duas molas associadas em série sujeitas a uma mesma força externa.....	46
Figura 22 – Gráfico de força elástica em função da deformação para molas lineares e não-lineares.....	49
Figura 23 – Poço de potencial do sistema oscilante.	51
Figura 24 – Comportamento da força restauradora para molas não-lineares.	51
Figura 25 – Representação das imperfeições de uma superfície aparentemente lisa.	52
Figura 26 – Gravura representando Leonardo da Vinci.	53

Figura 27 – Forças que atuam sobre um bloco em repouso numa superfície, sujeito a uma força externa.	54
Figura 28 – Bloco sujeito às mesmas forças, porém, com uma menor área de contato entre as superfícies.....	56
Figura 29 – Gráfico da força de atrito em função da força externa aplicada sobre o corpo.....	57
Figura 30 – Escola canadense Maple Bear em Fortaleza.	61
Figura 31 – Materiais utilizados na primeira aplicação do produto educacional.	67
Figura 32 – Estudante colocando as arruelas na mola, após a medição das massas, e analisando a consequente deformação ocasionada por cada uma (3° ano do ensino médio).	69
Figura 33 – alunos do 2° ano do ensino médio debatendo sobre a deformação da mola.	70
Figura 34 – Medição da deformação da mola feita pelos alunos do 3° ano do ensino médio com o auxílio da régua.	71
Figura 35 – Coleta de dados da força elástica e da posição da mola para medir a sua deformação (3° ano do ensino médio).....	71
Figura 36 – Cálculo da constante da mola helicoidal feita pelos alunos do 3° ano do ensino médio.	72
Figura 37 – Gráficos da força elástica em função da deformação para diferentes comportamentos da mola (3° ano do ensino médio).	72
Figura 38 – Gráfico de força elástica em função da deformação construída no 2° ano do ensino médio.	73
Figura 39 – Aluna fazendo as contas na lousa para encontrar o valor da constante elástica da mola (3° ano do ensino médio).....	74
Figura 40 – Materiais utilizados na segunda aplicação do produto educacional.....	76
Figura 41 – Aluno do 3° ano do ensino médio analisando as forças resultantes, as acelerações dos carrinhos bem como a constante elástica equivalente do sistema para duas molas de mesma constante associada em série.	78
Figura 42 – Aluno do 2° ano do ensino médio analisando a forças resultantes, as acelerações dos carrinhos bem como a constante elástica equivalente do sistema para duas molas de mesma constante associada em série.	79
Figura 43 – Aluno do 2° ano do ensino médio utilizando um elástico para analisar o comportamento da força de atrito de um bloco de madeira sobre o carrinho de papelão.	80
Figura 44 – Alunos do 3° ano do ensino médio analisando o comportamento da força de atrito entre o carrinho de papelão e os blocos de madeira em diferentes configurações.	81

Figura 45 – Alunos do 2º ano do ensino médio analisando a força de ação e de reação para um sistema com carrinhos de madeira e de papelão e molas associadas em série.	82
Figura 46 – Alunos do 3º ano do ensino médio analisando a força de ação e de reação para um sistema com carrinhos de madeira e de papelão e uma única mola.	83
Figura 47 - Alunos do 3º ano do ensino médio soltando os carrinhos para analisar o seu deslocamento por ação da força elástica.....	83

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultado da avaliação de conhecimentos prévios no 2º ano do ensino médio....	65
Gráfico 2 – Resultado da avaliação de conhecimentos prévios no 3º ano do ensino médio....	66
Gráfico 3 – Resultado da reavaliação da avaliação de conhecimentos prévios no 2º ano do ensino médio.....	85
Gráfico 4 – Resultado da reavaliação da avaliação de conhecimentos prévios no 2º ano do ensino médio.....	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Distribuição da sequência didática.	60
Quadro 2 – Questão conceitual de princípio da inércia.	62
Quadro 3 – Questão conceitual e histórica do princípio da inércia (Enem 2011, prova cinza, questão 88).	62
Quadro 4 – Questão de princípio fundamental da dinâmica.	63
Quadro 5 – Questão de força de atrito (Enem 2013, prova azul, questão 76).	63
Quadro 6 – Questão de força elástica e lei de Hooke.	63
Quadro 7 – Questão de lei de Hooke e molas não lineares.	64
Quadro 8 – Questão de lei de Hooke e associação de molas.	64
Quadro 9 – Questão de princípio da ação e da reação e lei de Hooke.	64
Quadro 10 – Lista de materiais necessários para o primeiro experimento.	67
Quadro 11 – Lista de materiais necessários para o segundo experimento.	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
3	REFERENCIAIS TEÓRICOS PEDAGÓGICOS	16
3.1	A Física e os Parâmetros Nacionais Curriculares do Ensino Médio	16
3.2	Base Nacional Comum Curricular	18
3.3	Competências gerais e competências específicas em Ciências da Natureza na BNCC	18
3.4	Habilidades na BNCC	20
3.5	Aprendizagem significativa	20
3.5.1	<i>Ideias iniciais</i>	20
3.5.2	<i>Subsunçor ou ideia-âncora</i>	21
3.5.3	<i>Diferenciação progressiva</i>	22
3.6	O ensino de Física por investigação	23
4	REVISÃO DE MECÂNICA CLÁSSICA	25
4.1	Uma breve história de Isaac Newton	25
4.2	Mecânica Clássica	26
4.3	Conceito de força e força resultante	27
4.4	A primeira lei de Newton	28
4.5	A segunda lei de Newton	29
4.6	A terceira lei de Newton	32
4.6.1	<i>O caminhar humano</i>	32
4.6.2	<i>Colisão entre automóveis</i>	33
4.6.3	<i>A remada no barco</i>	33
4.6.4	<i>Balão com ar</i>	34
4.7	Aplicações das Leis de Newton	35
4.7.1	<i>Força peso</i>	35
4.7.2	<i>Força normal</i>	39
4.7.3	<i>Força elástica</i>	39
4.7.3.1	<i>Robert Hooke</i>	40
4.7.3.2	<i>Análise gráfica da força por deformação</i>	42

4.7.3.3	<i>Associação de molas</i>	43
4.7.3.4	<i>Associação de molas em série</i>	43
4.7.3.5	<i>Associação de molas em paralelo</i>	45
4.7.3.6	<i>Razão entre as constantes elásticas nas associações de molas de molas iguais</i> ..	47
4.7.3.7	<i>Validade da lei de Hooke</i>	48
4.7.3.8	<i>Equação de Duffing</i>	49
4.7.4	<i>Força de atrito entre os sólidos</i>	52
5	METODOLOGIA	58
5.1	A importância da experimentação para o Ensino de Física na Educação	
	Básica	58
5.2	Sequência didática	59
5.3	Etapas da sequência didática no produto educacional	59
5.4	Local de aplicação e público-alvo	61
5.5	Aplicação do produto educacional	61
5.5.1	<i>Aula 01 – Avaliação de conhecimentos prévios</i>	61
5.5.2	<i>Aula 2 – Primeira aplicação</i>	66
5.5.2.1	<i>Materiais necessários</i>	67
5.5.2.2	<i>Objetivo geral da primeira aplicação</i>	68
5.5.2.3	<i>Objetivos específicos da primeira aplicação</i>	68
5.5.2.4	<i>Descrição da aula 2</i>	69
5.5.3	<i>Aula 3 – Segunda aplicação</i>	74
5.5.3.1	<i>Objetivo geral</i>	74
5.5.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	75
5.5.3.3	<i>Materiais necessários</i>	75
5.5.3.4	<i>Descrição da aula 3</i>	77
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL	91

1 INTRODUÇÃO

A Física é uma disciplina fundamental para a compreensão do mundo natural, sendo responsável por descrever fenômenos que vão desde o movimento dos corpos até as interações entre partículas subatômicas. Dentro desse vasto campo, a Mecânica Clássica se destaca por fornecer os princípios básicos que regem o comportamento dos objetos em nosso cotidiano. Dentre esses princípios, as leis de Newton e a lei de Hooke desempenham um papel essencial na descrição do movimento e das forças atuantes nos corpos.

O ensino da Física, e em particular da Mecânica Clássica, tem sido um desafio recorrente no ambiente escolar. Estudos indicam que muitos estudantes apresentam dificuldades em compreender conceitos abstratos, especialmente quando a abordagem utilizada é essencialmente teórica e desvinculada da realidade cotidiana. Além disso, a falta de experimentação e o uso excessivo de formalismo matemático podem dificultar a aprendizagem, tornando o conteúdo distante da vivência dos alunos. A aprendizagem significativa, proposta por Ausubel, enfatiza a necessidade de relacionar novos conceitos ao conhecimento prévio dos estudantes, tornando-os mais compreensíveis e relevantes para sua formação.

Historicamente, o ensino das leis de Newton tem sido tratado por meio de exposições teóricas e resolução de exercícios, com pouca ênfase na experimentação. No entanto, metodologias que incorporam atividades práticas e materiais acessíveis têm se mostrado eficazes para facilitar a compreensão desses conceitos. Diversos estudos demonstram que a experimentação não apenas desperta o interesse dos alunos, mas também promove uma aprendizagem mais duradoura e significativa, possibilitando a construção de modelos mentais mais concretos.

Diante desse cenário, esta dissertação propõe o desenvolvimento e a aplicação de uma sequência didática essencialmente baseada no uso de caixas de papelão, blocos de madeira e elásticos para explorar as leis de Newton e a lei de Hooke à luz da teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel. A escolha desses materiais se deve à sua disponibilidade e ao potencial de permitir experimentos simples, porém eficazes, que auxiliam na construção do conhecimento pelos alunos. O uso desses recursos permite criar um ambiente de aprendizagem ativo, no qual os estudantes podem testar hipóteses, manipular variáveis e observar os efeitos das forças em sistemas físicos reais.

O objetivo central deste estudo é investigar de que forma a utilização dessa abordagem experimental pode contribuir para a compreensão dos conceitos envolvidos,

promovendo um aprendizado mais significativo e engajador. Para isso, foi conduzida uma pesquisa aplicada em turmas do ensino médio da Escola Canadense Maple Bear, na qual os estudantes participaram ativamente de experimentos e responderam a questionários antes e depois da intervenção didática. Os resultados obtidos foram analisados para avaliar o impacto da metodologia proposta na assimilação dos conceitos.

Além da análise, esta dissertação também se apoia em uma revisão de literatura sobre estratégias inovadoras para o ensino de Física, incluindo estudos desenvolvidos no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF). Dessa forma, busca-se contribuir para o aprimoramento das práticas pedagógicas na área, fornecendo um material que possa ser utilizado por outros docentes interessados em tornar o ensino da Mecânica mais acessível e eficaz.

Assim, espera-se que este trabalho possa não apenas evidenciar a relevância da experimentação no ensino das leis de Newton e da lei de Hooke, mas também oferecer uma alternativa viável e replicável para o ensino da Física na educação básica, incentivando práticas mais interativas e contextualizadas. Ao integrar conceitos teóricos com a prática experimental, esta dissertação pretende demonstrar que o aprendizado pode ser mais efetivo quando os alunos têm a oportunidade de construir seu próprio conhecimento por meio da experiência direta.

A presente dissertação está estruturada em seções distintas que desenvolvem os principais aspectos da pesquisa. A revisão de literatura apresenta os fundamentos teóricos que embasam o trabalho, abordando as leis de Newton, a lei de Hooke, a Teoria da Aprendizagem Significativa, a importância da experimentação no ensino de Física e as diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC). A seção de metodologia descreve as etapas de elaboração e aplicação do produto educacional, com foco na sequência didática desenvolvida e no contexto da sua implementação. Em resultados e discussões, são analisados os dados obtidos a partir da aplicação da proposta didática, com interpretações qualitativas e quantitativas sobre o desempenho dos estudantes. Por fim, nas considerações finais, são apresentadas as principais conclusões da pesquisa, suas contribuições para o ensino de Física e sugestões para futuras investigações.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura que fundamenta este trabalho foi realizada por meio de um levantamento sistemático em diversas bases de dados e repositórios relevantes para o ensino de Física. As buscas foram conduzidas utilizando as plataformas do repositório do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), SciELO e Portal de Periódicos CAPES, abrangendo publicações até julho de 2025. As palavras-chave utilizadas, em suas diferentes combinações, incluíram 'leis de Newton', 'lei de Hooke', 'aprendizagem significativa', 'sequência didática', 'ensino de Física' e 'ensino por investigação'.

Como critério de inclusão, foram selecionados artigos científicos e dissertações que abordassem a temática do ensino de Mecânica Clássica e metodologias ativas, especialmente a experimentação e a teoria da aprendizagem significativa. Dos 23 trabalhos identificados no repositório do MNPEF sobre 'leis de Newton' e 'lei de Hooke', 4 foram criteriosamente selecionados para análise aprofundada por sua pertinência direta com os objetivos desta dissertação, contribuindo para contextualizar a pesquisa e identificar lacunas no conhecimento.

A partir dos trabalhos analisados, é possível notar uma forte convergência na busca por superar as limitações do ensino tradicional de Física e na valorização de metodologias ativas que promovam uma aprendizagem mais contextualizada e significativa. Vários estudos desenvolvidos no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), por exemplo, evidenciam essa tendência, focando em como a experimentação e as sequências didáticas podem aprimorar a compreensão dos conceitos de mecânica clássica.

Nesse sentido, Telles (2020) demonstrou o potencial das Sequências de Ensino Investigativas (SEIs) para desenvolver a Alfabetização Científica de alunos do Ensino Fundamental, mesmo em um contexto de aplicação remota. Complementarmente, Menezes (2016) propôs uma sequência didática para o Ensino Médio que, ao integrar metodologias como a *peer instruction* e o uso de simulações digitais, resultou em maior engajamento e compreensão dos conceitos das leis de Newton. Essas abordagens convergem para a necessidade de afastar o ensino da simples exposição teórica e aproximá-lo da vivência dos alunos.

Corroborando essa perspectiva, as pesquisas de Pereira (2016) e Nitsche (2019) oferecem um suporte valioso ao evidenciar a eficácia da experimentação no ensino de mecânica. Pereira (2016), por exemplo, validou um Material Instrucional (MI) para o ensino das leis de Newton e Cinemática, mostrando que a contextualização e estratégias motivacionais contribuem para um aprendizado significativo. De forma similar, Nitsche (2019) utilizou kits

de laboratório com molas helicoidais para o ensino da lei de Hooke, observando maior compreensão dos conceitos físicos quando os estudantes participavam ativamente das atividades práticas. Juntos, esses trabalhos reforçam a importância de abordagens pedagógicas que aliam a teoria à prática, utilizando recursos que permitam ao aluno manipular e investigar os fenômenos.

O conceito de sequência didática que fundamenta essas propostas é articulado por Ugalde e Roweder (2020), que a definem como um conjunto de ações estruturadas para atingir propósitos educacionais específicos, abrangendo as etapas de planejamento, aplicação e avaliação. Essa abordagem é reforçada pela visão de Sasseron e Carvalho (2015), que defendem o ensino por investigação como uma forma de desafiar os alunos a formular hipóteses e construir explicações, destacando o papel da argumentação e de múltiplas linguagens nesse processo para o desenvolvimento da alfabetização científica.

Finalmente, a análise de Aranha et al. (2016) sobre molas não-lineares expande essa discussão ao ir além do modelo ideal de Hooke. Os autores mostram que o comportamento da força restauradora pode variar de forma crescente (endurecimento) ou decrescente (suavização) em relação ao deslocamento, ressaltando que a assimilação dessas particularidades é crucial para o entendimento de fenômenos em aplicações tecnológicas, como no piano. Essa investigação específica justifica a abordagem desta dissertação em aprofundar a exploração da lei de Hooke em cenários que se aproximam da não-linearidade.

Em suma, a literatura revisada aponta para um consenso de que as metodologias ativas, a experimentação e as sequências didáticas, fundamentadas em teorias como a da aprendizagem significativa, são alternativas eficazes para o ensino de Física na educação básica. Esta dissertação se inspira e se alinha a essas abordagens, propondo e avaliando uma sequência didática com materiais de baixo custo, combinando elementos da mecânica newtoniana e da elasticidade, de forma a contribuir para a melhoria das práticas pedagógicas e para um aprendizado mais engajador e significativo.

3 REFERENCIAIS TEÓRICOS PEDAGÓGICOS

O ensino de Física no Brasil enfrenta desafios estruturais e metodológicos que comprometem a qualidade da aprendizagem. Entre os principais problemas, destacam-se a ausência de práticas experimentais, a dependência excessiva do livro didático, a predominância do ensino expositivo, a defasagem curricular e a falta de incentivo à formação docente. Esses fatores contribuem para a desmotivação dos estudantes e para a precarização do ensino desse componente curricular (Sousa; Aguiar, 2019).

Historicamente, iniciativas voltadas para a melhoria do ensino de Física surgiram a partir da década de 1960, impulsionadas pelo avanço científico e tecnológico da época, causados pela corrida espacial entre Estados Unidos e a antiga União Soviética (Sousa; Aguiar, 2019). No entanto, mesmo com a implementação de políticas educacionais como a lei de Diretrizes e Bases da Educação e as Diretrizes Curriculares Nacionais, muitos desafios ainda persistem. A falta de infraestrutura nas escolas, a desvalorização da carreira docente e o baixo índice de formação de professores de Física continuam sendo obstáculos para a melhoria da educação na área.

Diante desse cenário, algumas medidas são fundamentais para transformar o ensino de Física no Brasil. A adoção de metodologias investigativas, o uso de tecnologias educacionais, o fortalecimento da experimentação em sala de aula e a valorização da profissão docente são estratégias essenciais para reverter o quadro atual. Além disso, é necessário um esforço conjunto entre escolas, universidades e órgãos governamentais para garantir uma formação mais sólida para os futuros professores e um ensino de Física mais dinâmico e acessível para os estudantes.

A superação desses desafios passa por uma revisão das políticas educacionais e pela implementação de práticas pedagógicas que estimulem a curiosidade científica e a autonomia dos alunos (Sousa; Aguiar, 2019). Somente com investimentos estruturais e metodológicos será possível garantir uma educação de qualidade e formar cidadãos mais preparados para compreender e interagir com o mundo físico ao seu redor.

3.1 A Física e os Parâmetros Nacionais Curriculares do Ensino Médio

Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) e os PCN+ Ensino Médio, publicados pelo Ministério da Educação, configuram-se como documentos orientadores fundamentais para

a educação básica brasileira. Os PCN, criados a partir da lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional, fornecem diretrizes curriculares para o Ensino Fundamental e, posteriormente, também para o Ensino Médio, visando à qualidade educacional ao apresentar objetivos, conteúdos e orientações didáticas (Brasil, 2002). Em complemento, os PCN+ (publicados em 2002) são específicos para o Ensino Médio, aprofundando e detalhando essas orientações. Ambos não constituem um currículo obrigatório, mas sim diretrizes e complementos que buscam uma formação cidadã e contextualizada, preparando os estudantes para compreender e intervir na realidade em que vivem, independentemente de sua continuidade nos estudos formais da Física.

A partir das diretrizes estabelecidas nos PCN+, a inserção do conhecimento de Física nesse nível de escolaridade assume uma nova perspectiva. O foco principal reside na construção de uma compreensão da Física que capacite o cidadão contemporâneo a ser atuante e solidário, munindo-o de ferramentas para compreender, intervir e participar ativamente da realidade. Dessa forma, mesmo os jovens que não prossigam seus estudos em Física em outras esferas profissionais ou universitárias, terão adquirido a formação essencial para interpretar e engajar-se no mundo em que vivem (Brasil, 2002).

A Física deve, assim, ser apresentada como um arcabouço de competências específicas que permitam a percepção e a interação com os fenômenos naturais e tecnológicos. Isso se aplica tanto ao cotidiano imediato quanto à compreensão de conceitos mais amplos do universo, sempre embasados nos princípios, leis e modelos que a própria Física elabora. Tal abordagem implica, igualmente, a introdução à linguagem particular da Física, que se utiliza de conceitos e terminologias bem definidas, além de formas de expressão que frequentemente incluem tabelas, gráficos e relações matemáticas (Brasil, 2002). Concomitantemente, é fundamental que a Física seja reconhecida como um processo histórico de construção contínua, impregnado por contribuições culturais, econômicas e sociais, que impulsiona o desenvolvimento tecnológico e, por sua vez, é por ele realimentado.

Contudo, as competências voltadas para a interação com o mundo físico perdem significado quando desenvolvidas de forma isolada. A formação de competências em Física para a vida se dá em um contexto presente, em articulação com habilidades de outras áreas do saber e permeada por outros conhecimentos. Elas adquirem sentido somente quando integradas às demais competências almejadas para a realidade desses jovens (Brasil, 2002). Em outras palavras, a orientação para a construção do conhecimento físico deve ser dada pela realidade

educacional e pelos projetos pedagógicos das escolas, os quais expressam os objetivos formativos mais amplos a serem atingidos.

3.2 Base Nacional Comum Curricular

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) é um documento normativo que estabelece as aprendizagens essenciais que todos os estudantes do país devem adquirir de forma progressiva durante as etapas da educação básica. Seu objetivo é garantir os direitos de aprendizagem e desenvolvimento dos alunos, em alinhamento com o Plano Nacional de Educação (PNE). Ela é aplicável exclusivamente à educação escolar e se fundamenta em princípios éticos, políticos e estéticos, promovendo a formação integral dos indivíduos e a construção de uma sociedade inclusiva, democrática e justa, de acordo com as Diretrizes Curriculares Nacionais da Educação Básica (DCN) (Brasil, 2018).

Nesse sentido, a BNCC serve como referência nacional para a elaboração dos currículos dos sistemas e redes escolares dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, bem como para as propostas pedagógicas das instituições de ensino do país. Além disso, a BNCC integra a política nacional da Educação Básica contribuindo para o alinhamento de outras políticas e ações nas esferas estaduais, distritais e municipais, referentes à formação de professores, à avaliação, à elaboração de conteúdos educacionais e aos critérios para a oferta de infraestrutura adequada para o pleno desenvolvimento da educação (Brasil, 2018).

3.3 Competências gerais e competências específicas em Ciências da Natureza na BNCC

Durante toda educação básica, as aprendizagens essenciais devem concorrer de modo a assegurar aos estudantes o desenvolvimento de dez competências gerais que consolidam, no âmbito pedagógico, os direitos de aprendizagem e desenvolvimento (Brasil, 2018).

Partindo disso, segundo a BNCC, tem-se a definição de competência como sendo a mobilização de conhecimentos – conceitos e procedimentos; habilidades – práticas, cognitivas e socioemocionais; atitudes e valores. Tudo isso voltado para que o estudante consiga resolver as demandas complexas do cotidiano, do pleno exercício da cidadania e do mundo do trabalho, que trazem grandes desafios (Brasil, 2018).

As competências gerais inter-relacionam-se e desdobram-se no tratamento didático apresentado para as etapas da educação básica, a saber, educação infantil, ensino fundamental e ensino médio. Isso articula a construção de conhecimentos, no desenvolvimento de habilidades e na formação de atitudes e valores nos moldes da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB) (Brasil, 2018). A título de exemplo, pode-se relacionar a Física com a seguinte competência geral 2:

Exercitar a curiosidade intelectual e recorrer à abordagem própria das ciências, incluindo a investigação, a reflexão, a análise crítica, a imaginação e a criatividade, para investigar causas, elaborar e testar hipóteses, formular e resolver problemas e criar soluções (inclusive tecnológicas) com base nos conhecimentos das diferentes áreas. (Brasil, 2018, p. 9).

Por outro lado, esse documento orgânico também estabelece competências específicas para o ensino de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, com o objetivo de garantir uma formação científica significativa e contextualizada. No ensino de Física, essas competências permitem que os alunos desenvolvam habilidades que os ajudem a compreender e interagir com o mundo ao seu redor.

Uma dessas competências é a compreensão e explicação de fenômenos naturais e tecnológicos a partir de conceitos científicos. Essa habilidade possibilita a conexão entre os conhecimentos físicos e o cotidiano dos estudantes, favorecendo uma aprendizagem significativa, conforme a teoria de Ausubel. No estudo do movimento de veículos, por exemplo, a análise das leis de Newton pode facilitar a compreensão sobre como as forças atuam no deslocamento e na frenagem de um automóvel, tornando o ensino mais próximo da realidade dos alunos.

Outra competência essencial prevista na BNCC é o uso de diferentes linguagens científicas e simbólicas, permitindo que os estudantes interpretem e representem fenômenos físicos por meio de gráficos, tabelas, diagramas e equações. Essa habilidade é essencial para a leitura e a comunicação da ciência, contribuindo para uma compreensão mais profunda dos conceitos. No estudo da cinemática, por exemplo, a análise de gráficos de velocidade em função do tempo auxilia na identificação do tipo de movimento e na interpretação das equações que o descrevem.

Além disso, a BNCC propõe que os alunos relacionem os conhecimentos científicos a questões socioambientais e tecnológicas, refletindo sobre os impactos das inovações

científicas na sociedade. Essa competência pode ser trabalhada no ensino de Física ao discutir temas como a eficiência energética e a sustentabilidade, analisando, por exemplo, o impacto ambiental do uso de combustíveis fósseis e a viabilidade dos veículos elétricos.

Por fim, ela incentiva o desenvolvimento da competência de tomada de decisões embasadas em evidências científicas, permitindo que os estudantes avaliem criticamente informações relacionadas à ciência e à tecnologia. Esse aspecto é fundamental para a formação de cidadãos que possam interpretar e argumentar com base em dados científicos, seja ao analisar a viabilidade de fontes alternativas de energia ou ao compreender os riscos e benefícios de novas tecnologias.

Ao integrar essas competências ao ensino de Física, a prática docente se torna mais dinâmica e significativa, preparando os alunos não apenas para os desafios acadêmicos, mas também para uma participação ativa e crítica na sociedade.

3.4 Habilidades na BNCC

A BNCC define um conjunto de habilidades para o ensino de Física no Ensino Médio, integrando conceitos científicos, experimentação e aplicações tecnológicas. No Ensino Fundamental, os conceitos de Física são abordados dentro da área de Ciências da Natureza, incentivando a observação de fenômenos, a realização de experimentos e a formulação de hipóteses, promovendo o pensamento crítico e a compreensão dos princípios científicos básicos.

No Ensino Médio, a BNCC detalha habilidades específicas que envolvem a análise e aplicação das leis físicas, a interpretação de fenômenos naturais e tecnológicos, além do uso da matemática e de recursos digitais para a resolução de problemas. A experimentação científica e a contextualização histórica da Física são enfatizadas, permitindo que os estudantes compreendam a evolução do conhecimento científico e sua relação com a sociedade.

3.5 Aprendizagem significativa

3.5.1 Ideias iniciais

A aprendizagem significativa acontece quando as novas ideias, representadas por símbolos, se conectam de maneira profunda e relevante com o conhecimento que o estudante

já tem. Essa interação é "substantiva" porque não se trata de algo apenas literal ou superficial, e "não-arbitrária" porque a ligação se dá com um conhecimento anterior específico e importante, já presente na mente de quem está aprendendo (Moreira, 2011).

De modo geral, pode-se dizer que a aprendizagem significativa é caracterizada pela interação entre os conhecimentos já existentes – chamado de prévios, e os conhecimentos novos. Nesse evento, os novos conhecimentos ganham significado para discente e os conhecimentos prévios adquirem novos significados ou maior estabilidade cognitiva.

3.5.2 Subsunçor ou ideia-âncora

Dentro da aprendizagem significativa há o subsunçor ou ideia-âncora. Ele pode ser um símbolo já significativo, um conceito, uma proposição, um modelo mental, uma imagem, podendo ser especificamente relevante à nova aprendizagem (Moreira, 2011). Por exemplo, geralmente na Matemática da educação básica usa-se o delta (Δ) para referir-se ao discriminante, uma quantidade que depende dos valores dos coeficientes de uma função quadrática. Já na Física, geralmente se usa o mesmo símbolo para referir-se à variação de alguma grandeza, como posição, velocidade e tempo. Desse modo, pode-se fazer uma ligação entre o que o aluno já sabe sobre aquele símbolo e novos conhecimentos na área das Ciências Naturais.

Exemplificando a tese, para um aluno que já compreende a primeira lei de Newton (ou o princípio da inércia), resolver exercícios que envolvem corpos em repouso ou em Movimento Retilíneo Uniforme (MRU) serve para consolidar seu conhecimento e aumentar sua confiança e clareza sobre o conceito. No entanto, ao ser apresentado à segunda lei de Newton, ele começa a expandir essa compreensão inicial ao ver a relação entre força, massa e aceleração. O aluno passa a compreender a nova lei ao conectar com o conceito de inércia que já possui, tornando-o mais complexo e abrangente. Com isso, a noção de inércia ganha novas camadas de significado, pois ele percebe que ela se aplica tanto a corpos em repouso quanto em movimento, mas que, para mudar esse estado, é necessária uma força que resulte em uma aceleração proporcional à força aplicada e inversamente proporcional à massa. (Moreira, 2011).

Nesse sentido, através de sucessivas interações, um determinado subsunçor, como o vetor força resultante \vec{F}_r na segunda lei de Newton, vai, de forma progressiva, adquirindo novos significados, vai ficando mais rico, mais refinado, mais diferenciado, e mais capaz de servir de ancoradouro para novas aprendizagens significativas.

3.5.3 Diferenciação progressiva.

À luz da aprendizagem significativa, a diferenciação progressiva é o processo de atribuição de novos significados a um determinado subsunçor, que pode ser, por exemplo, um conceito ou uma proposição, resultante da sucessiva utilização deste para dar significado a novos conhecimentos:

Lembremos que a aprendizagem significativa decorre da interação não-arbitrária e não-literal de novos conhecimentos com conhecimentos prévios (subsunçores) especificamente relevantes. Através de sucessivas interações, um dado subsunçor vai, de forma progressiva, adquirindo novos significados, vai ficando mais rico, mais refinado, mais diferenciado, e mais capaz de servir de ancoradouro para novas aprendizagens significativas (Moreira, 2011, p. 14).

A diferenciação progressiva é o processo pelo qual um conceito, uma proposição, ou uma ideia já existente – ou seja, um subsunçor – adquire novos significados por meio da sua utilização sucessiva na assimilação de novos conhecimentos. Para exemplificar este mecanismo da teoria, é pertinente analisar a evolução do conceito de força. Antes do período escolar, o indivíduo constrói uma noção intuitiva, associando a força a vivências do cotidiano, como puxar, empurrar, esforço físico ou a ausência de capacidade ("não ter força"). Ao iniciar os estudos formais, essa ideia-âncora passa por um enriquecimento. Apresenta-se ao estudante a força gravitacional, que é compreendida como uma atração entre corpos dotados de massa e regida por uma lei específica de natureza universal.

Nessa interação, o subsunçor original "força" é aprimorado e diferenciado, incorporando o significado da atração entre corpos massivos. Posteriormente, em outro nível de ensino, o aluno é exposto à força eletromagnética, que se relaciona com uma propriedade distinta da matéria: a carga elétrica. Novamente, em uma aprendizagem significativa, ocorre uma interação: a força eletromagnética adquire sentido, e o subsunçor "força" é refinado, passando a englobar a dualidade de ser atrativa ou repulsiva e manifestar-se tanto como força elétrica quanto magnética (Moreira, 2011).

Além da diferenciação progressiva, a aprendizagem significativa também envolve um processo denominado reconciliação integrativa, no qual o aluno percebe conexões entre conceitos que antes pareciam isolados ou contraditórios. Esse processo permite que novas ideias sejam incorporadas de maneira mais estruturada à sua rede cognitiva, promovendo uma compreensão mais abrangente e coerente do conhecimento científico. Um exemplo disso ocorre

no estudo das forças fundamentais da natureza. Inicialmente, o estudante pode compreender a força gravitacional apenas como uma interação atrativa entre corpos com massa e a força eletromagnética como uma força que pode ser tanto atrativa quanto repulsiva. No entanto, à medida que seu conhecimento se expande, ele percebe que ambas fazem parte de um conjunto mais amplo de interações fundamentais e compartilham características comuns, como a dependência de grandezas físicas específicas e a ação à distância. Esse refinamento conceitual permite não apenas a ampliação do conhecimento, mas também sua reorganização dentro de uma estrutura cognitiva mais integrada, tornando o aprendizado mais significativo e facilitando a assimilação de novos conceitos científicos ao longo da formação acadêmica (Moreira, 2011).

3.6 O ensino de Física por investigação

O ensino de Física pode ser muito mais do que a simples memorização de fórmulas e a aplicação mecânica de equações. Para que os alunos compreendam verdadeiramente os conceitos físicos e sua relevância no mundo real, é essencial adotar abordagens que estimulem o pensamento crítico, a experimentação e a construção ativa do conhecimento (Sasseron, 2015).

Uma dessas abordagens é a alfabetização científica, que busca desenvolver nos estudantes a capacidade de interpretar fenômenos físicos, avaliar dados experimentais e compreender como o conhecimento científico é construído. Em vez de apenas decorar definições e resolver listas de exercícios, os alunos devem ser incentivados a explorar a Física de forma contextualizada, relacionando-a ao seu cotidiano e às inovações tecnológicas (Sasseron, 2015).

O ensino por investigação complementa essa proposta ao transformar a sala de aula em um espaço de experimentação e descoberta. Em vez de receberem todas as respostas prontas, os alunos são desafiados a formular hipóteses, projetar experimentos, testar variáveis e analisar resultados (Sasseron, 2015). Essa metodologia permite, por exemplo, que estudantes compreendam as leis de Newton ao projetar situações experimentais que demonstrem a relação entre força e aceleração, em vez de apenas aplicar equações abstratas. Esse processo não apenas facilita a compreensão, mas também estimula a curiosidade e o interesse pela ciência.

Além disso, a argumentação desempenha um papel fundamental na construção do conhecimento em Física. Ao defender suas hipóteses, justificar seus resultados e confrontar diferentes interpretações dos fenômenos observados, os alunos desenvolvem habilidades essenciais para a ciência, como a capacidade de análise crítica e o raciocínio lógico. A discussão

de conceitos físicos em grupo, a interpretação de gráficos e a explicação dos resultados de um experimento são exemplos de práticas que tornam o aprendizado mais interativo e significativo (Sasseron, 2015).

Integrar essas abordagens ao ensino de Física exige um planejamento cuidadoso por parte dos professores, que devem criar oportunidades para que os alunos participem ativamente do processo de aprendizagem. A utilização de experimentos, simulações computacionais, projetos investigativos e debates em sala de aula são estratégias que favorecem esse modelo (Sasseron, 2015). Com isso, é possível transformar o ensino de Física em uma experiência mais envolvente e alinhada à forma como o conhecimento científico é realmente produzido e aplicado na sociedade.

4 REVISÃO DE MECÂNICA CLÁSSICA

Em consonância com a estrutura e os objetivos desta dissertação, a presente seção dedica-se à revisão dos conceitos de Mecânica Clássica que fundamentam o Produto Educacional. Serão abordados, de forma aprofundada e contextualizada, os principais princípios da dinâmica newtoniana – como as leis de Newton – e os conceitos e equações de força elástica – em particular, a lei de Hooke. O propósito desta revisão não é apenas revisar o conteúdo teórico, mas também estabelecer um alicerce sólido para a compreensão das atividades experimentais propostas e para a análise dos resultados obtidos, garantindo que a estrutura teórica do trabalho esteja claramente esboçada antes de sua aplicação prática.

4.1 Uma breve história de Isaac Newton

Isaac Newton (1643-1727) foi um dos cientistas mais influentes da história, atuando como catedrático na Inglaterra dos séculos XVII e XVIII, um período marcado por transformações políticas e científicas. Suas contribuições para a Física e a Matemática foram fundamentais para a consolidação do método científico e a formulação de leis que descrevem o funcionamento do mundo natural. Entre suas principais realizações, destacam-se a formulação das leis do Movimento e da lei da Gravitação Universal, avanços na Óptica e o desenvolvimento, de forma independente e simultânea a Gottfried Leibniz, do cálculo diferencial e integral (Yamamoto; Fuke, 2016).

Além de sua atuação na ciência, Newton também teve participação na política e na administração pública, exercendo cargos como deputado no Parlamento inglês, guardião da Casa da Moeda Real e presidente da Royal Society, instituição fundada em 1660 com o objetivo de promover o conhecimento científico.

Antes de Newton, os fenômenos físicos eram discutidos sem o suporte matemático necessário para descrevê-los com precisão, e a experimentação ainda não era amplamente utilizada como ferramenta de validação de hipóteses. Esse cenário começou a mudar no século XVI, com Galileu Galilei, que investigou a inércia e o equilíbrio das forças, utilizando a Matemática como linguagem essencial para a Física. Paralelamente, René Descartes contribuiu para a concepção mecanicista do universo e ampliou o conceito de inércia (Yamamoto; Fuke, 2016).

Newton reuniu e expandiu esses trabalhos, estabelecendo a Mecânica como um campo estruturado por leis universais expressas matematicamente. Sua obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, publicada em 1687, marcou a consolidação da Física como uma ciência moderna (Yamamoto; Fuke, 2016). Para lidar com os desafios matemáticos de suas teorias, ele desenvolveu o cálculo de variações, ferramenta indispensável para a Mecânica e para o avanço da Física como um todo. Na Figura 1, ilustra-se uma pintura desse grande físico.

Figura 1 – Pintura de Isaac Newton.



Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 134).

4.2 Mecânica Clássica

A mecânica estuda o movimento e o repouso dos corpos a nível macroscópico sem se preocupar com efeitos microscópicos. Desse modo, a mecânica estuda, por exemplo, o movimento de um carro, mas não trata do movimento de agitação de seus átomos.

Desde a antiguidade, o homem tenta explicar os fenômenos que ocorrem na natureza, sendo o movimento dos corpos o primeiro a chamar a atenção. Nesse sentido, pode-se citar nomes como Aristóteles, Arquimedes, Ptolomeu, Copérnico, Galileu, Kepler e Newton como alguns dos grandes expoentes que alavancaram a mecânica (Doca; Biscuola; Bôas, 2012).

Dentro da mecânica tem-se a dinâmica, que estuda as causas do movimento dos corpos. Nela, são estabelecidas relações entre massa, força e aceleração. As grandezas fundamentais nesta área são: comprimento, tempo e massa (Doca; Biscuola; Bôas, 2012). Nesse sentido, existe uma relação entre a força e a aceleração que foi desenvolvida por Isaac Newton.

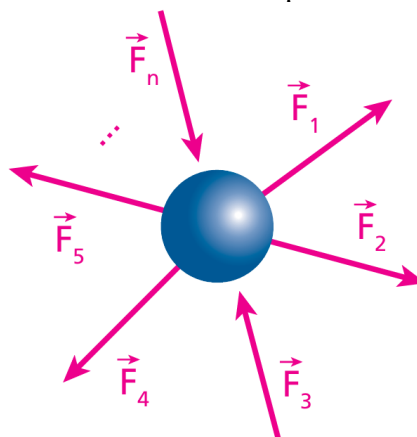
Outro ponto crucial é que a mecânica que trata dessa relação só pode ser aplicada a corpos com velocidades muito menores que a da luz.

Nesta área da Física, a escolha de um referencial é um passo fundamental. Define-se como referencial inercial aquele em que as leis de Newton, em particular a lei da Inércia, são estritamente válidas. Em tal referencial, um corpo isolado de interações (força resultante nula) se move com velocidade constante. Em contraste, em um referencial não inercial, um corpo nessas mesmas condições parece acelerar, o que exige a introdução das chamadas forças fictícias ou de inércia para descrever seu movimento (Halliday; Resnick; Walker, 2011). No presente trabalho, serão considerados apenas os referenciais inerciais.

4.3 Conceito de força e força resultante

Na Física newtoniana, força é uma grandeza vetorial capaz de alterar o estado de movimento dos corpos – modificando sua direção, sentido e velocidade ou retirando-os do repouso, além de ocasionar deformações. Nesse mesmo viés, tem-se também a força resultante, que é equivalente ao somatório das forças que agem num ponto ou num corpo no espaço, como mostra a Figura 2 a seguir (Doca; Biscuola; Bôas, 2012).

Figura 2 – Diversas forças atuando sobre um corpo.



Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 136).

Sua representação pode ser dada por:

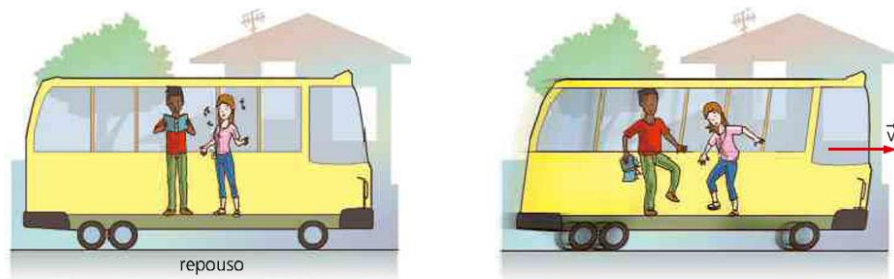
$$\vec{F}_r = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + \vec{F}_5 \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \quad (1)$$

4.4 A primeira lei de Newton

A primeira lei de Newton, também chamada de lei da inércia, afirma que um objeto permanecerá em repouso ou em movimento retilíneo uniforme, a menos que uma força externa interfira e mude essa condição. Essa ideia é fundamentada nos estudos de Galileu sobre a inércia, que pode ser definida como a resistência de um corpo à mudança em seu estado de movimento. Quanto maior a massa de um objeto, maior será sua inércia, o que significa que ele oferece maior resistência a qualquer alteração em sua velocidade. Essa lei também explica que, quando a força resultante sobre um corpo é nula, sua velocidade não muda (Halliday; Resnick; Walker, 2010).

Considere a seguinte situação cotidiana que evidencia a inércia: ao permanecermos em pé dentro de um ônibus parado, nosso corpo encontra-se em repouso em relação à Terra. No instante em que o veículo entra em movimento, sentimos uma aparente projeção para trás, no sentido oposto ao deslocamento do ônibus, como mostra a Figura 3. Esse efeito ocorre devido à tendência natural do nosso corpo de manter seu estado de repouso, conforme descrito pelo princípio da inércia (Yamamoto; Fuke, 2016).

Figura 3 – Efeito da inércia em passageiros de um ônibus. À esquerda, o veículo e os passageiros estão em repouso. À direita, quando o ônibus inicia um movimento acelerado, os passageiros tendem a manter seu estado de movimento anterior (o repouso).



Fonte: Yamamoto e Fuke (2016, p. 139).

Os princípios da inércia são fundamentais para os profissionais que atuam na área de astronáutica e propulsão de foguetes, sendo um fator essencial no planejamento e execução de operações espaciais. Em um ambiente onde a influência gravitacional de corpos celestes é minimizada, uma nave, uma vez posta em movimento, continuará seguindo uma trajetória retilínea sem a necessidade de propulsão contínua (Yamamoto; Fuke, 2016). Dessa forma, qualquer alteração nesse movimento requer um planejamento criterioso, uma vez que até

mesmo pequenos objetos, como ferramentas ou parafusos, ao receberem um impulso não intencional, podem permanecer em deslocamento indefinido e representar um risco significativo caso colidam com a estrutura da nave.

Na Figura 4, os astronautas Jeffrey Hoffman e Story Musgrave estão instalando uma câmera planetária no famoso telescópio espacial Hubble. Nota-se que o trabalho é realizado com os astronautas presos aos braços mecânicos visto que qualquer colisão, por mais leve que seja, pode afastá-los indefinidamente do ônibus espacial Endeavour por inércia (Yamamoto; Fuke, 2016).

Figura 4 – Astronautas Jeffrey Hoffman e Story Musgrave instalando uma câmera planetária no telescópio espacial hubble.



Fonte: Yamamoto e Fuke (2016, p. 140).

4.5 A segunda lei de Newton

Para explicar as causas dos movimentos dos corpos e complementar a lei da inércia, a segunda lei de Newton, chamada de princípio fundamental da dinâmica, fala sobre a relação entre a força resultante \vec{F}_r que atua sobre um corpo de massa m e sua taxa de variação de velocidade, ou seja, sua aceleração \vec{a} em um referencial inercial (Nussenzveig, 2002).

A base dessa lei encontra-se no momento linear p , que é definido como sendo o produto da massa m do corpo pela velocidade vetorial \vec{v} da seguinte forma:

$$\vec{p} \equiv m\vec{v} \quad (2)$$

Desse modo, convém destacar que:

- a) se \vec{v} é um vetor, então \vec{p} também será um vetor;
- b) \vec{p} tem a mesma direção e sentido de \vec{v} ;
- c) à medida que aumenta a intensidade da quantidade de movimento de um corpo, ele apresenta um maior "poder de impacto" (Doca; Biscuola; Bôas, 2012).

Partindo disso, pode-se derivar o momento linear do corpo em relação ao tempo.

Desse modo:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}) \quad (3)$$

Utilizando a regra do produto na derivada do lado direito da igualdade, obtém-se:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{dm}{dt}\vec{v} + m\frac{d\vec{v}}{dt} \quad (4)$$

Considerando, respectivamente, que a variação temporal de massa é igual a μ e que a variação temporal da velocidade vetorial é a aceleração vetorial \vec{a} , a equação (4) pode ser reescrita como:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \mu\vec{v} + m\vec{a} \quad (5)$$

A força \vec{F} é definida como a variação temporal do momento linear. Desse modo, pode-se escrever:

$$\vec{F} \equiv \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (6)$$

Considerando que a equação (6) trata da variação total do momento linear de um sistema de massa variável, então a força no sistema será a resultante \vec{F}_r . Assim:

$$\vec{F}_r = \mu\vec{v} + m\vec{a} \quad (7)$$

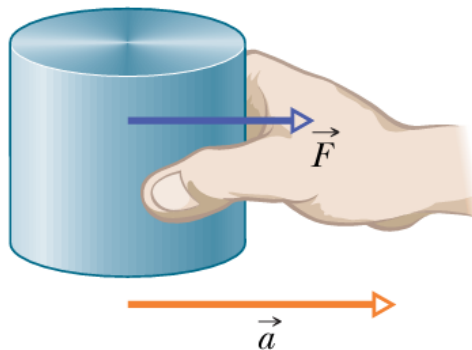
Essa é a segunda lei de Newton para sistemas de massas variáveis (Nussenzveig, 2002).

Por outro lado, caso o sistema apresente variação temporal de massa nula, tem-se a forma base para a segunda lei de Newton:

$$\vec{F}_r = m\vec{a} \quad (8)$$

A equação (8) pode ser interpretada da seguinte forma: se uma força resultante \vec{F}_r for aplicada em um corpo de massa m , ele irá adquirir uma aceleração \vec{a} , na mesma direção e sentido, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Força aplicada sobre um corpo e produzindo aceleração.



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2011, p. 88).

Em contrapartida, fazendo a análise dimensional da equação (8), tem-se, em concordância com o Sistema Internacional de Unidades (SI):

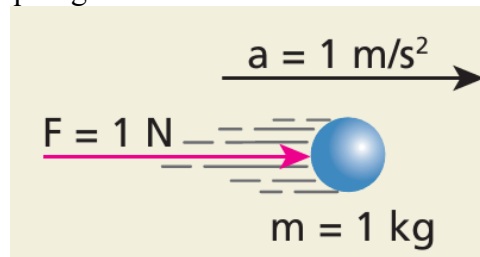
$$[\text{força}] = [\text{massa}] \cdot [\text{aceleração}] \Rightarrow \quad (9)$$

$$\text{newton} = \text{quilograma} \cdot \text{metro}/\text{segundo}^2 \Rightarrow \quad (10)$$

$$N = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 \quad (11)$$

Logo, de acordo com a equação (11), a equação (8) mostra que a intensidade da força aplicada em uma partícula de massa igual a 1 quilograma produzindo na sua direção e no seu sentido uma aceleração de módulo 1 metro por segundo, por segundo é definida como 1 newton (N), como mostra a seguinte Figura 6.

Figura 6 – Efeito cinemático de um newton sobre um corpo de um quilograma.



Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 143).

4.6 A terceira lei de Newton

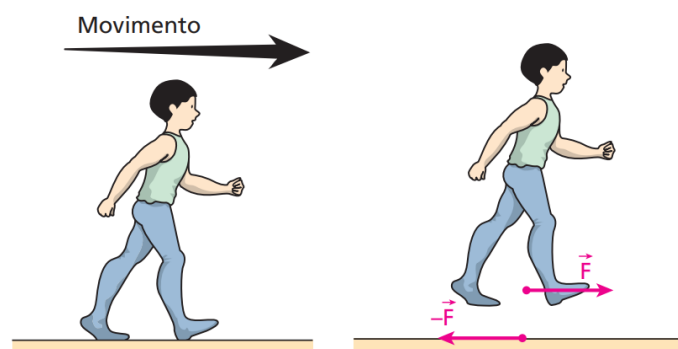
O princípio da ação e reação trata da interação entre dois ou mais corpos no quais as forças aparecem aos pares (Yamamoto; Fuke, 2016). Ele diz que a toda força de ação corresponde uma de reação, de modo que elas têm sempre:

- a) mesmo módulo;
- b) mesma direção;
- c) sentidos opostos;
- d) atuação em corpos diferentes;
- e) mesma natureza.

4.6.1 O caminhar humano

Ao caminhar, uma pessoa exerce uma força para trás sobre o solo. Em resposta, o solo aplica uma força de igual magnitude e direção oposta sobre a pessoa, impulsionando-a para frente, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Par de forças numa caminhada.



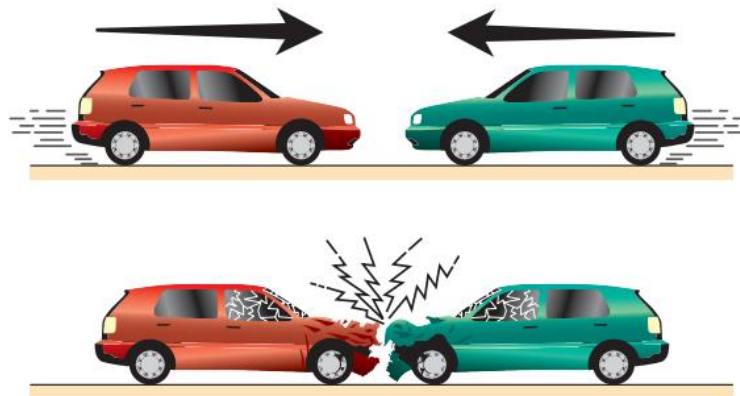
Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 160).

Esse fenômeno mostra que a força de ação é exercida sobre o solo, enquanto a força de reação atua sobre a pessoa, garantindo seu deslocamento (Doca; Biscuola; Bôas, 2012).

4.6.2 Colisão entre automóveis

Na colisão entre dois automóveis, ambos sofrem deformações, evidenciando a interação entre forças de ação e reação como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Colisão entre dois móveis que estão na mesma direção mas em sentidos opostos.



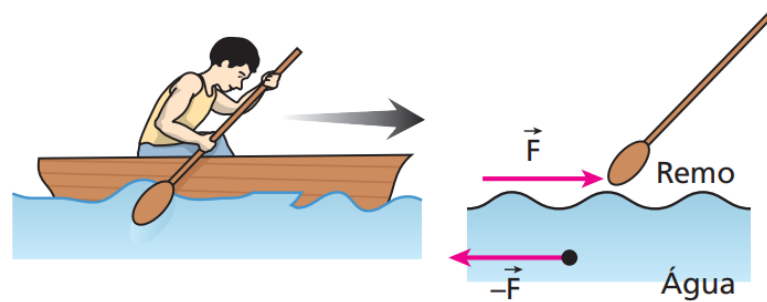
Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 160).

Quando um dos veículos exerce uma força sobre o outro, este responde com uma força de mesma intensidade, mesma direção e sentido oposto. No entanto, apesar de as forças trocadas serem equivalentes, o grau de deformação em cada automóvel dependerá da resistência estrutural da região atingida, sendo menor nas áreas de maior resistência (Doca; Biscuola; Bôas, 2012).

4.6.3 A remada no barco

O remo exerce uma força de intensidade $-\vec{F}$ sobre a água, empurrando-a para trás. Em resposta, a água aplica uma força de reação \vec{F} sobre o remo, em sentido oposto. Isso é ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Par de forças na remada em um barco.



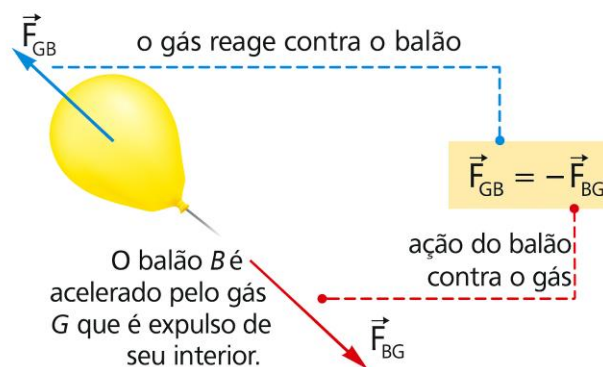
Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 160).

É importante destacar que a força de ação está aplicada na água, enquanto a força de reação atua sobre o remo. Esse exemplo também demonstra que as forças de ação e reação possuem mesma magnitude, direções opostas e atuam em corpos distintos (Doca; Biscuola; Bôas, 2012).

4.6.4 Balão com ar

No caso do balão, a força de ação corresponde à massa de ar que é empurrada para fora da boca do balão (\vec{F}_{GB}). A força de reação, por sua vez, é a força de mesma intensidade e direção, mas de sentido contrário, que o ar exerce sobre o balão, impulsionando-o. (\vec{F}_{BG}) é justamente essa força de reação. Isso é representado na Figura 10 a seguir:

Figura 10 – Par de forças no balão com ar.



Fonte: Adaptado de Yamamoto e Fuke (2016, p. 142).

Esse exemplo do balão pode ser usado como analogia para entender como os foguetes são lançados da superfície de um planeta.

4.7 Aplicações das Leis de Newton

4.7.1 Força peso

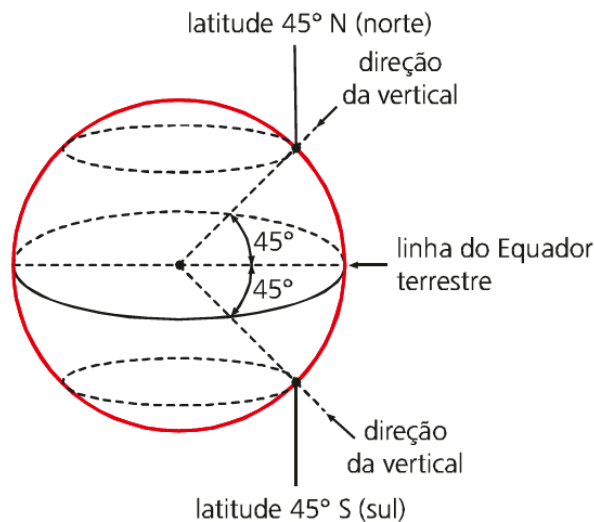
A força peso é uma das grandezas fundamentais na mecânica clássica e desempenha um papel crucial na compreensão das interações gravitacionais. Trata-se da força gravitacional exercida na superfície de um corpo celeste, como a Terra, sobre um objeto com massa. Sua formulação matemática é expressa por:

$$\vec{P} \equiv m\vec{g} \quad (12)$$

onde \vec{P} representa o vetor força peso, m é a massa do corpo e \vec{g} representa o vetor aceleração da gravidade no local considerado.

Por meio de diversos experimentos, pôde-se constatar que, ao nível do mar e em um local de latitude 45° , o módulo de \vec{g} vale $9,80665 \text{ m/s}^2$ conforme é ilustrado na Figura 11 (Yamamoto; Fuke, 2016).

Figura 11 – Latitudes em que a gravidade assume o mesmo valor.



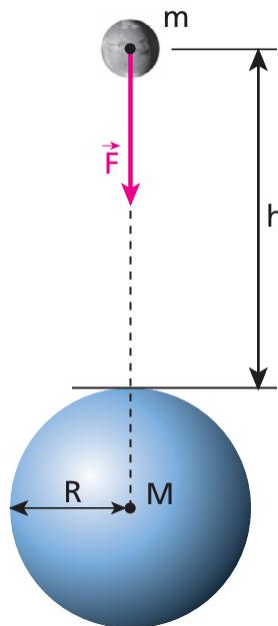
Fonte: Yamamoto e Fuke (2016, p. 69).

Além disso, percebe-se que um aspecto essencial da força peso é a sua dependência do campo gravitacional. Enquanto a massa de um corpo permanece constante, seu peso pode variar conforme a superfície do planeta ou satélite onde ele se encontra.

Do ponto de vista dinâmico, a força peso é responsável por inúmeros fenômenos físicos observáveis, como a queda livre dos corpos, o movimento de projéteis e o equilíbrio estático de estruturas.

Em uma análise mais abrangente, o peso de um corpo é substituído pelo conceito de força gravitacional em grandes altitudes. Essa força, que deve considerar a massa de ambos os corpos, é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre seus centros de massa (Doca; Biscuola; Bôas, 2012). Contudo, a direção e o sentido do vetor força sobre o corpo permanecem radiais e em direção à fonte do campo, como ilustra a Figura 12 a seguir.

Figura 12 – Corpo de massa m , situado a uma altura h em relação à superfície do corpo de massa M e raio R , sujeito a uma força de atração gravitacional \vec{F} .



Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 247).

Para esta situação, considerando uma generalização da equação (12), tem-se:

$$\vec{F} = m\vec{g} \quad (13)$$

onde \vec{F} é a força gravitacional sentida pelo corpo de prova de massa m devido ao campo gravitacional da gerado pela massa M , sendo que $M \gg m$.

Agora, utilizando a lei da atração gravitacional newtoniana, tem-se, em módulo:

$$\frac{GMm}{(R+h)^2} = mg \quad (14)$$

onde G é a constante de gravitação universal, R e M são, respectivamente, o raio e a massa do corpo fonte de campo gravitacional.

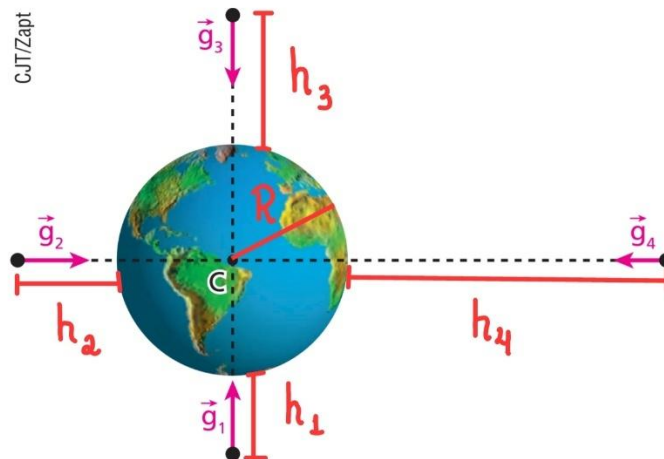
Vale ressaltar que o valor da constante de gravitação universal ($6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$), num mesmo sistema de unidades, independe do meio em que os corpos se encontram (Doca; Biscuola; Bôas, 2012).

Como a geração do campo gravitacional independe de corpos de prova, pode-se escrever a equação (14) como:

$$g = \frac{GM}{(R+h)^2} \quad (15)$$

Percebe-se que a equação (15) deixa nítida a relação entre distância e aceleração gravitacional. Tomando como exemplo as grandes alturas em relação a superfície do corpo fonte, pode-se analisar os diferentes valores do módulo de g , como mostra na Figura 13.

Figura 13 – Acelerações gravitacionais em grandes altitudes.



Fonte: Adaptado de Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 146).

Nesse sentido, considerando as alturas h_1, h_2, h_3 e h_4 respectivamente, na ordem crescente, tem-se:

$$\vec{g}_1 > \vec{g}_2 > \vec{g}_3 > \vec{g}_4 \quad (16)$$

Considerando a resistência do ar e fazendo uma análise da força resultante atuando num corpo em queda livre na superfície da Terra, tem-se:

$$\vec{F}_r = \vec{P} - \vec{F}_{at} \quad (17)$$

onde \vec{F}_{at} é a força de resistência do ar.

No entanto, em pequenas alturas e desprezando a geometria do corpo, tem-se um movimento de queda livre. Desse modo:

$$\vec{F}_{at} \rightarrow \vec{0} \Rightarrow \quad (18)$$

$$\vec{F}_r = \vec{P} \Rightarrow \quad (19)$$

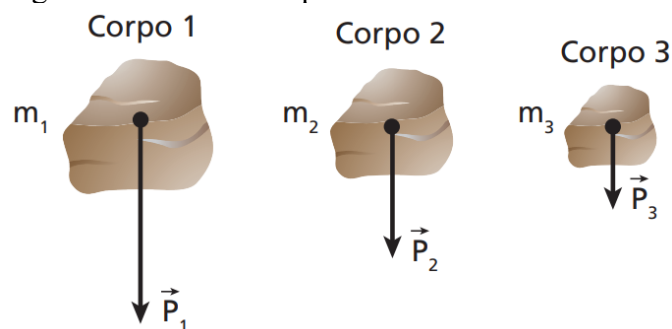
$$m\vec{a} = m\vec{g} \Rightarrow \quad (20)$$

$$\vec{a} = \vec{g} \quad (21)$$

A equação (21) mostra que a aceleração gravitacional independe da massa. Ou seja, todos os corpos na superfície da Terra, em pequenas altitudes, caem com a mesma taxa de variação de velocidade (Doca; Biscuola; Bôas, 2012).

Com essa conclusão, pode-se olhar a seguinte Figura 14 com diferentes massas na superfície da Terra:

Figura 14 – Diferentes pesos e diferentes massas.



Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 147).

Baseado no que foi exposto, pode-se expressar:

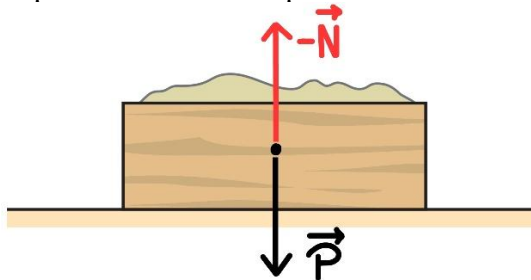
$$\frac{|\vec{P}_1|}{m_1} = \frac{|\vec{P}_2|}{m_2} = \frac{|\vec{P}_3|}{m_3} = \text{constante} \quad (22)$$

4.7.2 Força normal

A força normal, representada por F_n ou N , é uma força de contato que uma superfície exerce sobre um corpo. Sua principal característica é atuar perpendicularmente à superfície de contato, independentemente da inclinação ou curvatura da superfície. Essa força é uma manifestação da interação eletromagnética entre as partículas do corpo e da superfície (Nussenzveig, 2002).

Microscopicamente, essa força surge da repulsão eletrostática entre os átomos da superfície e do corpo em contato. Quando, por exemplo, um objeto repousa sobre uma superfície horizontal, ocorre uma deformação elástica devido ao seu contato e, conseqüentemente, o surgimento de uma força restauradora, como é explicitado pela seguinte Figura 15.

Figura 15 – Força peso e força normal atuando sobre uma caixa com areia que repousa sobre uma superfície horizontal.



Fonte: Adaptado de Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 186).

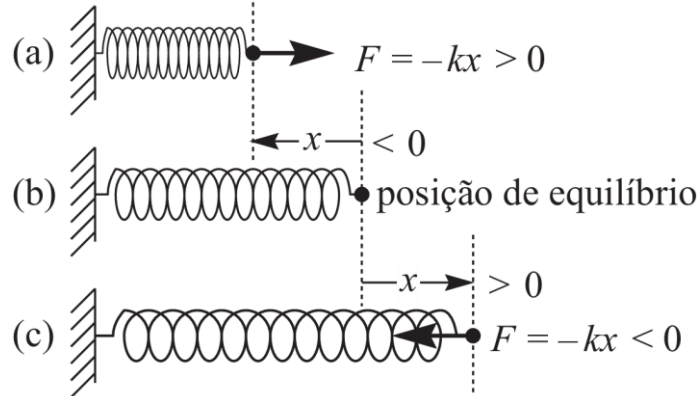
Nesse caso, à medida que o peso do conjunto caixa mais areia aumenta, para manter o equilíbrio estático na horizontal, a força normal também aumenta, de tal modo que:

$$\vec{P} + \vec{N} = \vec{0} \quad (23)$$

4.7.3 Força elástica

A força elástica é um tipo de força restauradora, ou seja, durante as deformações, tende a colocar o sistema na sua posição “relaxada” – também chamada de “posição de equilíbrio”. Na Figura 16 a seguir, tem-se na mola, respectivamente: (a) uma compressão; (b) um relaxamento; e (c) uma distensão (Nussenzveig, 2002).

Figura 16 – Comportamento da força elástica com a deformação da mola.



Fonte: Nussenzveig (2002, p. 115).

Para um x suficientemente pequeno, é válida a equação (24) a seguir, conhecida como lei de Hooke:

$$\vec{F} = -k\vec{x} \quad (24)$$

onde \vec{F} representa a força elástica, k representa a constante elástica, \vec{x} representa a deformação (alongamento ou encurtamento) sofrida pela mola de acordo com o referencial adotado (Nussenzveig, 2002). Desse modo, na análise da mola, pode-se dizer que:

- a) a força elástica, medida em newton (N) no SI, é proporcional ao deslocamento da posição de equilíbrio, medido em metro (m) também no SI;
- b) a constante elástica é uma característica de cada mola cuja dimensão é medida em newton por metro (N/m);
- c) a força elástica está na mesma direção da distensão e da compressão, porém, sentido contrário a elas.

4.7.3.1 Robert Hooke

Robert Hooke (1635-1705) foi um cientista inglês de grande habilidade prática, conhecido por sua postura crítica em relação a diversas ideias de seu contemporâneo Isaac Newton (Doca; Biscuola; Bôas, 2012). Ele pode ser apropriadamente considerado um filósofo natural, detentor de conhecimentos e ideias em todas as áreas das ciências de sua época, nas quais desenvolveu notáveis contribuições. A Figura 17 a seguir representa uma escultura desse importante cientista.

Figura 17 – Escultura de Robert Hooke.



Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 155).

Ele contribuiu significativamente para o aprimoramento de mecanismos baseados em molas, possibilitando a construção de relógios mais precisos. Além disso, aperfeiçoou o microscópio e, ao examinar fragmentos de cortiça com esse instrumento, identificou uma estrutura fundamental que denominou "célula", inspirado no termo latino *cellula*, que remete a pequenos compartimentos ou celas adjacentes. Esse conceito tornou-se essencial na biologia para descrever as unidades estruturais dos organismos vivos (Doca; Biscuola; Bôas, 2012).

A lei de Hooke também pode ser escrita na forma escalar da seguinte forma:

$$F = k\Delta x \quad (25)$$

onde Δx representa a deformação da mola em módulo.

Neste caso, pode-se definir o módulo da deformação da mola como a diferença entre o valor da posição final e posição inicial:

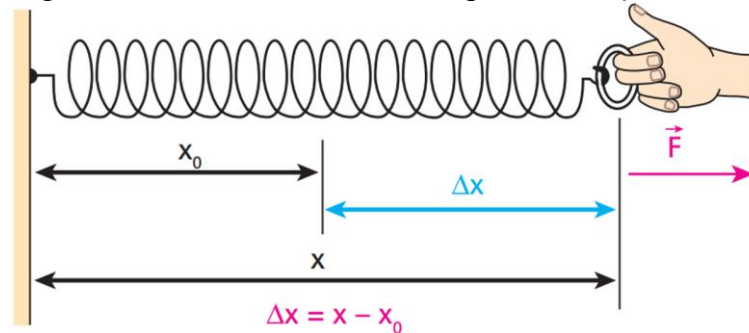
$$\Delta x \equiv x - x_0 \quad (26)$$

onde x_0 é o comprimento da mola relaxada, ou seja, sua posição inicial.

4.7.3.2 Análise gráfica da força por deformação

Considerando-se o seguinte modelo experimental representado na Figura 18, em que há uma mola helicoidal, de eixo horizontal sendo é puxada por uma pessoa para a direita, pode-se analisar a força elástica graficamente.

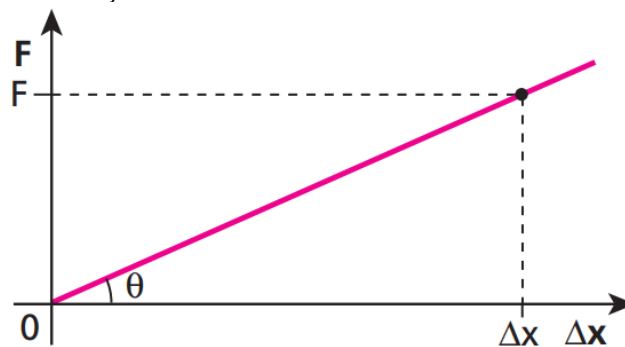
Figura 18 – Mola sendo distendida por uma força externa.



Fonte: Adaptado de Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 155).

Partindo disso e considerando que a mola esteja em regime de deformação elástica, o gráfico da intensidade da força exercida F por uma pessoa em função da deformação Δx é representado de acordo com seguinte Figura 19.

Figura 19 – Gráfico de força externa em função da deformação da mola.



Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 155).

Nesse caso, há pontos de equilíbrio estático onde intensidade da força F exercida pela pessoa tem o mesmo módulo da força elástica. Além disso, o comportamento linear dura até o limite de elasticidade da mola.

Como o gráfico tem um comportamento linear, então vale a seguinte função linear:

$$f(x) = ax \quad (27)$$

em que a é a constante de proporcionalidade positiva e diferente de zero.

De acordo com a equação (27), a constante elástica pode ser calculada com o auxílio do ângulo θ da seguinte forma:

$$\frac{dF}{dx} = \frac{F}{\Delta x} = \operatorname{tg}\theta \Rightarrow \quad (28)$$

$$k = \operatorname{tg}\theta \quad (29)$$

Isso implica que a curva formada pelo gráfico de força por deformação fornece a constante elástica da mola (Doca; Biscuola; Bôas, 2012).

Apesar da formulação da lei de Hooke ter sido apresentada com base na deformação de uma mola, sua aplicabilidade se estende a qualquer sistema elástico com comportamento semelhante. Como exemplo, pode-se citar uma tira de borracha ou um elástico que, quando submetidos à tração, também podem seguir essa lei.

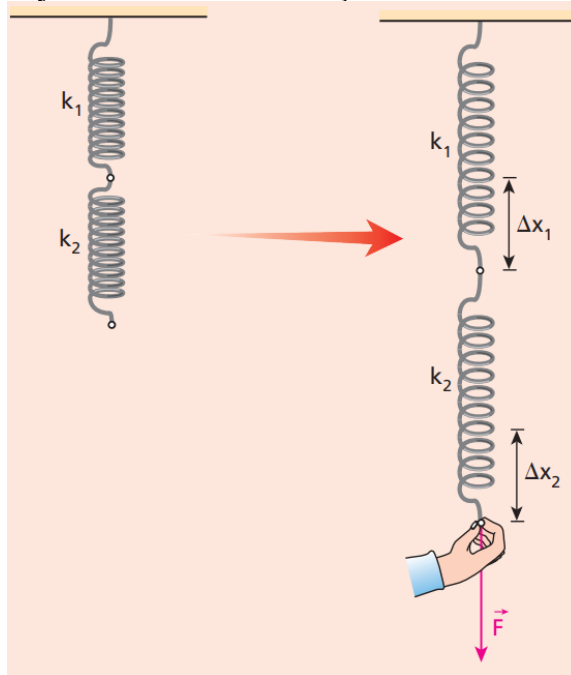
4.7.3.3 Associação de molas

A associação de molas é essencial em diversas aplicações para ajustar a rigidez e o comportamento elástico de um sistema mecânico. Em muitos dispositivos, como suspensões de veículos, camas, amortecedores e balanças industriais, a necessidade de controlar a resposta elástica exige a combinação de molas em série ou em paralelo. Nesse sentido, enquanto a associação em série reduz a rigidez do sistema, tornando-o mais flexível pela diminuição da constante elástica equivalente, a associação em paralelo aumenta a resistência à deformação por conta do aumento dessa constante (Doca; Biscuola; Bôas, 2012). Por isso, essa técnica permite distribuir cargas, minimizar vibrações e adaptar os sistemas mecânicos a diferentes condições de uso, garantindo eficiência e segurança em sua aplicação.

4.7.3.4 Associação de molas em série

Considerando que duas molas de massas desprezíveis com constantes elásticas respectivamente iguais a k_1 e k_2 obedeçam à lei de Hooke, pode-se analisar as deformações Δx_1 e Δx_2 ocasionadas pela força \vec{F} de acordo com a Figura 20 a seguir.

Figura 20 – Duas molas associadas em série sujeitas a uma mesma força externa.



Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 157).

Nessa situação, a intensidade da força aplicada na extremidade de uma das molas distribui-se igualmente sobre o sistema e causa deformação total Δx , de tal forma que:

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 \quad (30)$$

De acordo com a equação (25), pode-se escrever:

$$\Delta x = \frac{F}{k} \quad (31)$$

Substituindo a equação (31) na equação (30), tem-se:

$$\frac{F}{k_s} = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} \quad (32)$$

onde k_s é a constante elástica da associação em série do sistema.

Colocando-se F em evidência na equação (32), pode-se escrever:

$$\frac{F}{k_s} = F \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right) \Rightarrow \quad (33)$$

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (34)$$

A equação (34) também pode ser escrita como:

$$k_s = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (35)$$

Generalizando para um sistema com n molas associadas em série e constantes elásticas respectivamente iguais a $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$, a equação (34) pode ser expressa por:

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n} \Rightarrow \quad (36)$$

$$\frac{1}{k_s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \quad (37)$$

com $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Por outro lado, um sistema com N molas de constantes iguais a k tem uma constante equivalente igual a:

$$\frac{1}{k_s} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{k_i} = \frac{N}{k} \Rightarrow \quad (38)$$

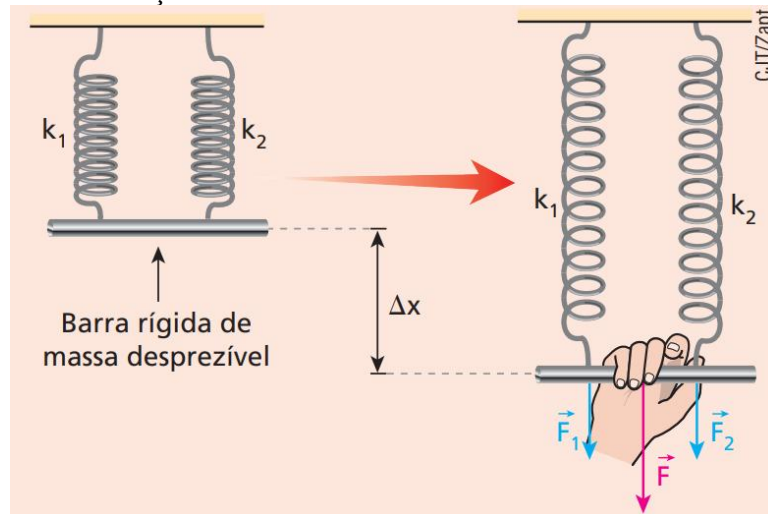
$$k_s = \frac{k}{N} \quad (39)$$

Desse modo, com molas diferentes ou iguais, a constante elástica equivalente do sistema em série diminui à medida que se coloca mais molas, tornando-o menos resistente às deformações e mais flexível.

4.7.3.5 Associação de molas em paralelo

Para essa associação, pode-se, inicialmente, analisar duas molas de constantes k_1 e k_2 dispostas em paralelo e apoiadas numa barra rígida de massa desprezível, conforme a seguinte Figura 21.

Figura 21 – Duas molas associadas em série sujeitas a uma mesma força externa.



Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 157).

Aplicando uma força de intensidade F no ponto central da barra, as duas molas sofrem a mesmas deformações Δx e a intensidade da força total aplicada na barra é dada pela soma das forças elásticas da mola de constante k_1 e k_2 . Desse modo, pode-se escrever, em módulo:

$$F = F_1 + F_2 \quad (40)$$

onde F_1 e F_2 são, respectivamente, as intensidades das forças aplicadas sobre as molas de constante k_1 e k_2 .

Tomando como base a equação (25), a equação (40) resulta em:

$$k_p \Delta x = k_1 \Delta x + k_2 \Delta x \quad (41)$$

onde k_p é a constante elástica equivalente da associação em série.

Desse modo, equação (41) torna-se:

$$k_p \Delta x = \Delta x (k_1 + k_2) \Rightarrow \quad (42)$$

$$k_p = k_1 + k_2 \quad (43)$$

Generalizando para um sistema com n molas associadas em paralelo e constantes elásticas respectivamente iguais a $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$, a equação (43) pode ser expressa por:

$$k_p = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n \Rightarrow \quad (44)$$

$$k_p = \sum_{j=1}^n k_j \quad (45)$$

com $j = 1, 2, 3, \dots, n$.

Desse modo, um sistema com N molas de constantes iguais a k tem uma constante equivalente igual a:

$$k_p = Nk \quad (46)$$

Portanto, com molas diferentes ou iguais, a constante elástica equivalente do sistema em paralelo aumenta à medida que se coloca mais molas, tornando-o mais resistente às deformações e mais estável.

4.7.3.6 Razão entre as constantes elásticas nas associações de molas de molas iguais

Como a equação (39) e a equação (46) falam como será a constante elástica equivalente do sistema para N molas iguais, pode-se fazer a razão entre k_s e k_p para saber a relação entre essas associações. Assim, pode-se escrever:

$$\frac{k_p}{k_s} = \frac{Nk}{\frac{k}{N}} \Rightarrow \quad (47)$$

$$\frac{k_p}{k_s} = N^2 \Rightarrow \quad (48)$$

$$k_p = N^2 k_s \quad (49)$$

Com isso, nota-se que, para N molas de constantes elásticas iguais a k , a constante elástica equivalente da associação em paralelo é N^2 vezes maior que a associação em série de um sistema.

4.7.3.7 Validade da lei de Hooke

A lei de Hooke é válida para pequenas deformações, de modo que a linearidade da Equação 15 seja respeitada. No entanto, para uma grande deformação, pode haver alterações na constante elástica por conta de alterações nas propriedades do material. Por outro lado, também existem as molas não lineares, que apresentam diferentes valores de k dependendo da força aplicada. Normalmente, uma mola se comporta de forma linear, mas existem meios que influenciam o seu comportamento de forma que funcione não linearmente. Nesse sentido, a rigidez da mola depende do seu número de espiras e do seu comprimento (Aranha *et al.*, 2016). Para uma mola helicoidal, a constante elástica k é calculada por:

$$k = \frac{4GJ}{n_c \pi D_0^3} \quad (50)$$

onde G é o módulo de cisalhamento, J é o momento de inércia de torção, n_c é o número de espiras e D_0 é o diâmetro médio da bobina.

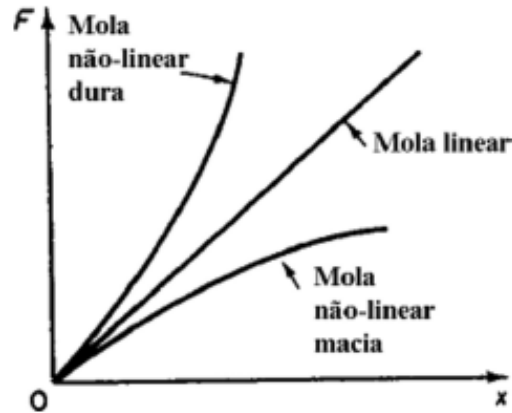
O momento de inércia de torção pode ser calcular por:

$$J = \frac{\pi}{32} d_o^4 \quad (51)$$

onde d_o é o diâmetro do fio.

Desse modo, nota-se que a não linearidade de uma mola pode ser conseguida variando seu número de espiras n_c ou o diâmetro do fio d_o (Aranha *et al.*, 2016). A Figura 22 a seguir mostra um exemplo de como pode se comportar a força por deformação em molas lineares e não lineares.

Figura 22 – Gráfico de força elástica em função da deformação para molas lineares e não-lineares.



Fonte: Aranha *et al.* (2016, local. 2).

Chamando a mola não-linear dura de 1, a mola linear de 2 e a mola não-linear macia de 3, é possível notar que, para uma deformação diferente de zero:

$$\left(\frac{dF}{dx}\right)_1 > \left(\frac{dF}{dx}\right)_2 > \left(\frac{dF}{dx}\right)_3 \quad (52)$$

Um exemplo notável de aplicação de molas não-lineares pode ser encontrado no mecanismo do piano. O martelo de madeira, recoberto por feltro, interage com as cordas de maneira que a sua rigidez, caracteristicamente não-linear, confere uma riqueza única à qualidade do som emitido. A modelagem matemática dessa não-linearidade pode ser estabelecida na relação seguinte relação:

$$F = \gamma u^p \quad (53)$$

onde F corresponde à força aplicada pelo martelo, γ designa um fator de escala, u mede o deslocamento ou a compactação do feltro, e p é um expoente que reflete o grau de não-linearidade (Aranha *et al.*, 2016).

4.7.3.8 Equação de Duffing

Amplamente reconhecida por sua relevância em diversas áreas como física, economia e engenharia, a equação de Duffing, em homenagem ao engenheiro electricista alemão Georg Duffing, é um modelo fundamental para descrever fenômenos oscilatórios e sistemas de

natureza caótica (Aranha *et al.*, 2016). Tradicionalmente, o oscilador de Duffing é expresso como:

$$\ddot{x} + \delta\dot{x} + \beta x + \alpha x^3 = F \cos(\omega t) \quad (54)$$

Na formulação da equação (54):

- a) $\ddot{x} + \beta x$ refere-se à parcela correspondente ao oscilador harmônico simples;
- b) $\delta\dot{x}$ é termo que denota o amortecimento do sistema;
- c) αx^3 é a primeira aproximação não linear do amortecedor;
- d) e $F \cos(\omega t)$ é a força oscilante externa sobre o sistema.

Este oscilador, que pode ser interpretado como uma mola não-linear forçada, possui uma força de restauração dada por:

$$F(x) = -\beta x - \alpha x^3 \quad (55)$$

A flexibilidade do modelo permite simular diferentes comportamentos de molas através do parâmetro α . Por exemplo: $\alpha > 0$, modela uma mola que endurece com a elongação, enquanto um $\alpha < 0$ representa uma mola que suaviza. A dinâmica do sistema também é influenciada por β . Especificamente, valores negativos de β resultam em um comportamento caótico para o oscilador de Duffing, manifestado pela configuração de um potencial de poço duplo (Aranha *et al.*, 2016).

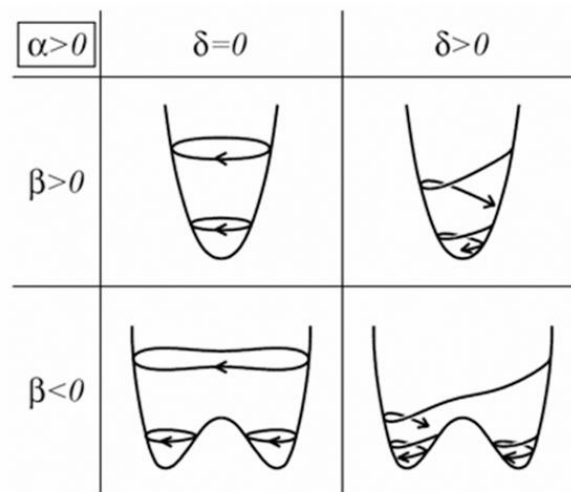
Desse modo, dado que uma mola metálica exibe sempre uma força restauradora $F(x)$, o potencial associado é do tipo poço. Quando não há amortecimento no sistema ($\delta = 0$), a equação de Duffing pode ser integrada resultando em:

$$V(x) = \frac{1}{2}x'^2 + \frac{1}{2}\beta x^2 + \frac{1}{4}\alpha x^4 + \text{constante} \quad (56)$$

onde $V(x)$ representa o potencial do sistema (Aranha *et al.*, 2016).

A Figura 23 a seguir exemplifica o comportamento do poço de potencial de um sistema oscilante de acordo com os possíveis valores da contante β , com $\alpha > 0$ e $\delta \geq 0$.

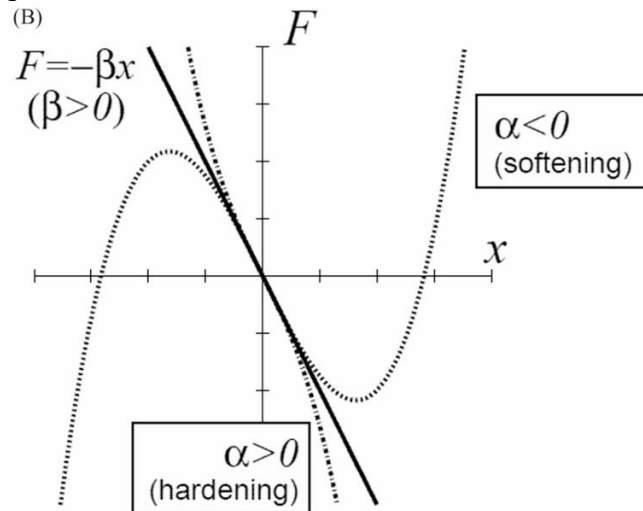
Figura 23 – Poço de potencial do sistema oscilante.



Fonte: Aranha *et al.* (2016, local. 5).

Assim, pode-se fazer uma análise qualitativa do comportamento da força restauradora em função da deformação para molas não-lineares, conforme mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Comportamento da força restauradora para molas não-lineares.



Fonte: Aranha *et al.* (2016, local. 5).

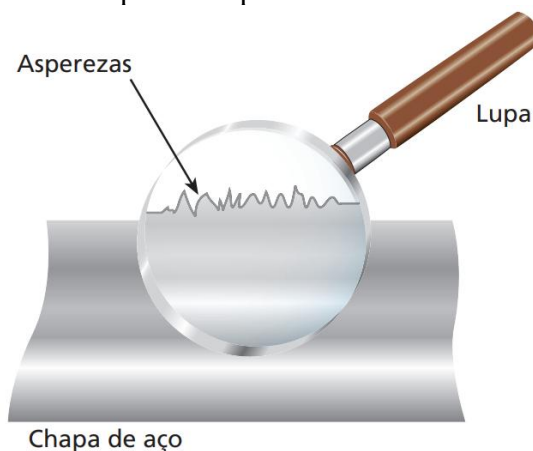
Portanto, a configuração desse potencial elástico esclarece o comportamento restaurador das forças, que atuam em oposição tanto à tração quanto à compressão, direcionando-se no sentido contrário à elongação das molas. A não-linearidade, por sua vez, manifesta-se especialmente em situações de elongação acentuada da mola (Aranha *et al.*, 2016). Nos casos investigados neste estudo, nota-se que:

- a) $\beta > 0$ indica que a constante β é positiva. Neste contexto, representa o coeficiente linear de restauração, análogo à constante elástica da lei de Hooke para uma mola linear. A linha reta mostra que a força é diretamente proporcional (e oposta) ao deslocamento;
- b) $\alpha < 0$ indica uma curva com comportamento de suavização (softening). Quando α é negativo, a mola fica "mais macia" (menos rígida) à medida que se alonga ou comprime em excesso.
- c) $\alpha > 0$ indica uma curva com comportamento de endurecimento (hardening). Quando α é positivo, a mola fica "mais dura" (mais rígida) à medida que se alonga ou comprime em excesso.

4.7.4 Força de atrito entre os sólidos

O atrito é um fenômeno físico que tem grande importância no acontecimento de determinados fatos na vida. De forma prática, nota-se que a força de atrito nos sólidos é oposta à tendência de deslizamento entre duas superfícies em contato. Isso ocorre devido às interações de origem eletromagnética entre os átomos das regiões de contato efetivo das duas superfícies (Doca; Biscuola; Bôas, 2012). Uma superfície qualquer, por mais bem polida que seja, sempre apresenta irregularidades que, em alguns casos, não podem ser vistas a olho nu, como exemplifica a Figura 25 a seguir.

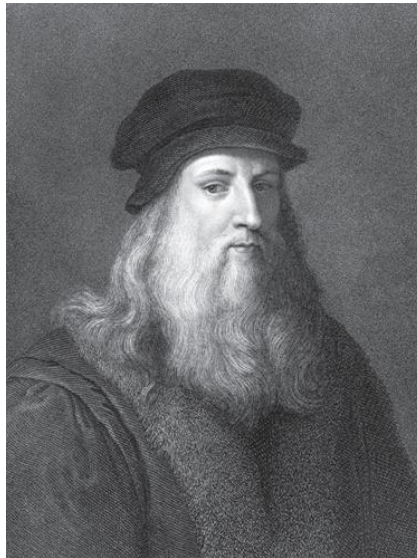
Figura 25 – Representação das imperfeições de uma superfície aparentemente lisa.



Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 184).

O italiano Leonardo da Vinci, um dos maiores mestres da arte renascentista e autor de obras famosas como a Mona Lisa, também era um cientista visionário de seu tempo. Ele foi o primeiro a apresentar a formulação das leis do atrito (Doca; Biscuola; Bôas, 2012). A gravura mostrada na seguinte Figura 26 pode ilustrar sua imagem.

Figura 26 – Gravura representando Leonardo da Vinci.



Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 195).

Quase duzentos anos antes de Isaac Newton propor formalmente o conceito de força, ele já dizia que:

- a) o atrito exige o dobro do esforço se o peso for duplicado;
- b) o atrito provocado pelo mesmo peso determinará a mesma resistência no início do movimento, mesmo que as áreas ou comprimentos de contato não sejam iguais.

Ainda nesse contexto, alguns séculos adiante, o cientista francês Charles Augustin Coulomb realizou vários experimentos sobre atrito e estabeleceu a diferença entre atrito estático e cinético (Doca; Biscuola; Bôas, 2012).

A forças de atritos no contato de dois corpos sólidos são tangenciais à superfície de contato entre ambas (Nussenzveig, 2002). Além disso, as leis que regem essas forças são empíricas e foram formuladas por volta do século XVII. Além de outras dependências, nota-se primeiramente que elas dependem:

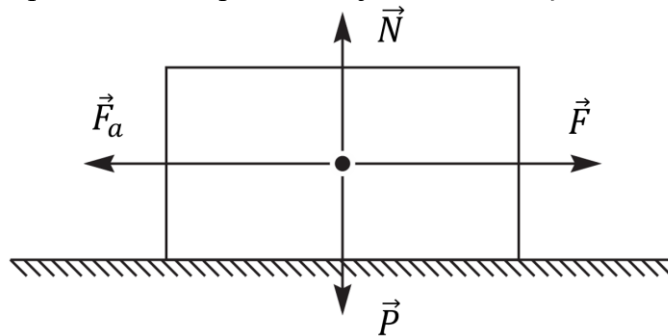
- a) da natureza dos materiais envolvidos;

b) do grau de polimento, presença ou não de camadas fluidas e da oxidação das superfícies.

Para exemplificar a força de atrito, pode-se considerar um bloco que repousa sobre uma superfície horizontal. Neste bloco, aplica-se uma força \vec{F} também na mesma horizontal. Na prática, nota-se que, a medida em que se aumenta a o módulo de \vec{F} , o bloco não se movimenta a menos que este agente atinja um valor limite \vec{F}_a (Nussenzweig, 2002).

A Figura 27 mostra a representação esquemática de todas as forças que atuam sobre o bloco, inclusive a força peso \vec{P} e a força normal \vec{N} .

Figura 27 – Forças que atuam sobre um bloco em repouso numa superfície, sujeito a uma força externa.



Fonte: Adaptado de Nussenzweig (2002, p. 115).

Neste caso, considerando a direção vertical y , o somatório das forças sobre o bloco deve ser nulo. Isso implica em:

$$\sum \vec{F}_y = \vec{N} + \vec{P} = \vec{0} \Rightarrow \quad (57)$$

$$\vec{N} = -\vec{P} \Rightarrow \quad (58)$$

$$|\vec{N}| = |\vec{P}| \quad (59)$$

Desse modo, conclui-se que o módulo da força normal deve ser igual ao módulo da força peso.

Em contrapartida, considerando a direção horizontal x , o somatório das forças sobre o bloco também deve ser nulo. Com isso:

$$\sum \vec{F}_x = \vec{F} + \vec{F}_a = \vec{0} \Rightarrow \quad (60)$$

$$\vec{F} = -\vec{F}_a \Rightarrow \quad (61)$$

$$|\vec{F}| = |\vec{F}_a| \quad (62)$$

Com isso, verifica-se na prática que o módulo da força de atrito anula o módulo da força aplicada até a iminência de movimento do bloco, de tal modo que (Nussenzveig, 2002):

$$|\vec{F}| < F_e \quad (63)$$

onde F_e é o valor crítico da força de atrito estático.

Pode-se notar que, enquanto isso acontece, a força de atrito se ajusta automaticamente para equilibrar a força aplicada, mantendo assim o corpo em repouso, ou seja, em um equilíbrio estático.

De posse dessas informações e através de experimentos e coleta de dados, nota-se que a força de atrito estático máxima $|\vec{F}_a|_{máx}$, para a qual o bloco fica na iminência de movimento, é diretamente proporcional ao módulo da força normal de contato entre as duas superfícies. Desse modo:

$$|\vec{F}_a|_{máx} = \mu_e |\vec{N}| = F_e \quad (64)$$

onde μ_e é o coeficiente de atrito estático entre o bloco e a superfície plana.

Fazendo a análise dimensional do μ_e com o auxílio da equação (64), tem-se:

$$\mu_e = \frac{|\vec{F}_a|_{máx}}{|\vec{N}|} \Rightarrow \quad (65)$$

$$[\mu_e] = \frac{[|\vec{F}_a|_{máx}]}{[|\vec{N}|]} \Rightarrow \quad (66)$$

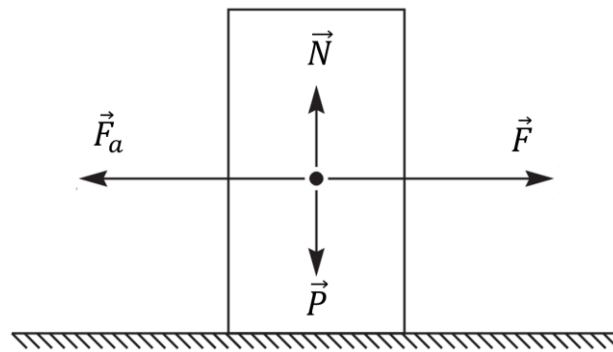
$$[\mu_e] = 1 \quad (67)$$

Portanto, nota-se que o coeficiente de atrito estático é adimensional.

Também por coleta de dados e experimentação, nota-se que a força de atrito estático máxima independe da área de contato entre os dois corpos (Nussenzveig, 2002). Assim, ao colocar-se o mesmo bloco apoiado sobre uma face de área menor, $|\vec{P}|$ e $|\vec{N}|$ não se alteram e,

consequentemente, F_e também não, mesmo que a área de contato agora seja menor, como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Bloco sujeito às mesmas forças, porém, com uma menor área de contato entre as superfícies.



Fonte: Adaptado de Nussenzveig (2002, p. 116).

Uma vez atingido o valor da força de atrito estático máxima, depois que o bloco começa a deslizar, nota-se uma diminuição na força de atrito, o que permite equilibrá-la com uma força \vec{F} de módulo menor. Nesse caso, surge a força de atrito cinético F_c , a qual o módulo pode ser calculado de acordo com a equação (68):

$$F_c = \mu_c |\vec{N}| \quad (68)$$

onde μ_c é o coeficiente de atrito cinético entre o bloco e a superfície.

Dessa maneira, em um MRU, nota-se que:

$$|\vec{F}_a|_{máx} > F_c \Rightarrow \quad (69)$$

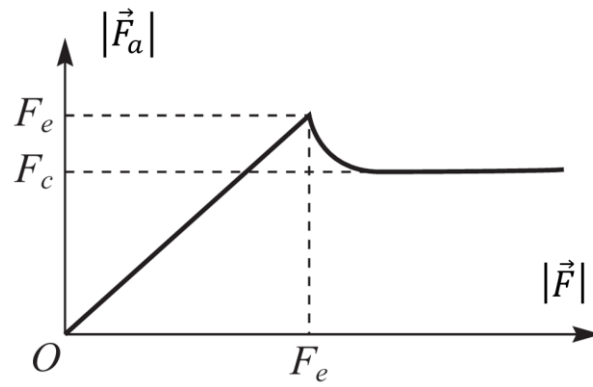
$$\mu_e |\vec{N}| > \mu_c |\vec{N}| \Rightarrow \quad (70)$$

$$\mu_e > \mu_c \quad (71)$$

Ou seja, o coeficiente de atrito estático é maior que o cinético. Isso implica que é mais fácil deixar um corpo em movimento do que tirá-lo do repouso.

Para valores não muito elevados e com um movimento na mesma direção e sentido, μ_c é aproximadamente independente da velocidade do bloco (Nussenzveig, 2002). Com isso, fazendo-se uma análise gráfica, obtém-se a Figura 28.

Figura 29 – Gráfico da força de atrito em função da força externa aplicada sobre o corpo.



Fonte: Adaptado de Nussenzveig (2002, p. 116).

5 METODOLOGIA

5.1 A importância da experimentação para o Ensino de Física na Educação Básica

A experimentação é uma ferramenta fundamental para tornar o ensino de Física na educação básica mais dinâmico, acessível e significativo. Em vez de apenas decorar fórmulas e aplicar regras abstratas, os alunos podem visualizar fenômenos, manipular materiais e comprovar, na prática, os conceitos físicos. Esse contato direto com os experimentos permite uma compreensão mais profunda dos princípios científicos e desperta a curiosidade para investigar o funcionamento do mundo ao seu redor (Araújo; Abib, 2003).

No entanto, a forma como as atividades experimentais são conduzidas pode influenciar diretamente a maneira como os alunos aprendem. Existem três abordagens principais para a experimentação no ensino de Física, a saber, as atividades de demonstração, as atividades de verificação e as atividades investigativas.

As atividades de demonstração são experimentos realizados pelo professor, enquanto os alunos apenas observam. Esse método pode ser útil para ilustrar conceitos complexos de maneira visual e concreta, tornando as aulas mais atrativas. Por exemplo, para explicar a lei da inércia, o professor pode demonstrar o experimento da toalha puxada sob objetos dispostos sobre uma mesa. No entanto, a passividade dos alunos nesse tipo de atividade pode limitar o aprendizado, pois eles não interagem diretamente com o experimento nem refletem sobre os processos envolvidos (Araújo; Abib, 2003).

Já as atividades de verificação envolvem a participação ativa dos alunos, que seguem um roteiro experimental para confirmar leis físicas já conhecidas. Um exemplo clássico é a medição da aceleração de um objeto em um plano inclinado para comprovar a segunda lei de Newton. Esse tipo de atividade é eficaz para reforçar a relação entre teoria e prática, ajudando os estudantes a consolidarem os conceitos aprendidos. No entanto, se os experimentos forem conduzidos de forma rígida e mecânica, apenas como uma sequência de passos a serem seguidos, os alunos podem realizá-los sem realmente compreender a lógica por trás dos fenômenos (Araújo; Abib, 2003).

Por outro lado, as atividades investigativas são aquelas que mais estimulam a autonomia, a criatividade e o pensamento científico. Em vez de receberem um roteiro pronto, os alunos são incentivados a formular hipóteses, testar diferentes abordagens e interpretar os resultados por conta própria. Esse método aproxima a sala de aula do verdadeiro trabalho

científico, onde os erros fazem parte do processo de aprendizado. Um exemplo seria desafiar os alunos a determinar o coeficiente de atrito entre dois materiais, permitindo que escolham os instrumentos e estratégias para obter os dados. Essa abordagem favorece o pensamento crítico e promove um aprendizado mais profundo e duradouro (Araújo; Abib, 2003).

Nesse sentido, é importante incentivar os alunos a questionarem, refletirem e fazerem conexões entre os experimentos e situações do cotidiano. Dessa forma, o ensino de Física pode se tornar mais envolvente, estimulando a curiosidade dos estudantes e contribuindo para a formação de cidadãos mais críticos e preparados para lidar com os desafios do mundo moderno.

5.2 Sequência didática

Sequência didática ou atividades didáticas refere-se a um conjunto de ações organizadas de forma estruturada e interligada, com o objetivo de alcançar determinados propósitos educacionais. Essas atividades possuem um início e um fim bem definidos, sendo compreendidos tanto pelos professores quanto pelos alunos. Embora não haja uma distinção rígida entre sequência didática e sequência de atividades, sua construção segue critérios específicos, envolvendo três etapas principais: planejamento, onde se define a abordagem pedagógica; aplicação, que consiste na execução das atividades em sala de aula; e avaliação, momento em que se analisam os resultados e o impacto do processo de ensino-aprendizagem (Roweder; Ugalde, 2020).

Nesse sentido, a forma como as atividades são configuradas em sequências constitui um dos principais elementos que diferenciam as práticas pedagógicas, englobando desde a tradicional "aula magistral" até os "projetos de trabalho global". A sequência didática serve, portanto, como um instrumento que integra as fases cruciais da intervenção reflexiva: planejamento, aplicação e avaliação. Contudo, para uma compreensão e avaliação integral da prática educativa, é fundamental que as atividades sejam examinadas em sua globalidade, e não apenas em seus componentes isolados (Zabala, 1998).

5.3 Etapas da sequência didática no produto educacional

A sequência didática deste trabalho consistiu em 4 aulas, aplicadas conforme o Quadro 1 a seguir:

Quadro 1 – Distribuição da sequência didática.

Aplicação da sequência didática	
Aula 1	Aplicação da avaliação de conhecimentos prévios sobre leis de Newton e lei de Hooke com 8 questões.
Aula 2	Experimentação sequencial de lei de Hooke com molas helicoidais cilíndricas de caderno, arruelas, torre de sustentação e balança de precisão.
Aula 3	Experimentação sequencial de leis de Newton com molas helicoidais cilíndricas de caderno, caixa de papelão, tampas de garrafas, madeira, elásticos e lixa.
Aula 4	Reaplicação do questionário de conhecimentos prévios para aferir a efetividade da aplicação do produto educacional.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição dessas etapas do produto educacional para a educação básica tem o objetivo de promover a construção do conhecimento sobre as leis de Newton e a lei de Hooke de forma significativa, por meio de uma sequência didática que envolve a investigação dos conhecimentos prévios dos alunos, a realização de experimentos práticos e a avaliação da aprendizagem. Desse modo, a proposta busca incentivar a participação ativa dos estudantes, permitindo que relacionem conceitos teóricos à experiência prática, desenvolvam habilidades científicas e consolidem a compreensão dos princípios físicos envolvidos na dinâmica e na elasticidade.

A primeira etapa, que consiste na aplicação de um questionário de conhecimentos prévios, permite identificar as concepções iniciais dos alunos sobre os temas abordados. Esse diagnóstico é essencial para compreender as dificuldades e os conhecimentos já adquiridos pelos estudantes, possibilitando um planejamento mais eficaz das atividades didáticas e garantindo que a abordagem seja alinhada às necessidades da turma.

Já na segunda e na terceira etapa, os alunos participam de experimentos práticos com mediação e supervisão do professor. Essa experimentação orientada possibilita a relação entre teoria e prática, permitindo que os estudantes explorem os conceitos físicos de maneira concreta e participativa. Além disso, essa abordagem estimula o pensamento crítico, a curiosidade científica e a autonomia na construção do conhecimento, tornando o aprendizado mais envolvente e dinâmico.

Por fim, na quarta etapa, o questionário inicial é reaplicado, permitindo uma análise comparativa entre os conhecimentos prévios e os adquiridos ao longo da experiência. Esse

procedimento possibilita avaliar a evolução conceitual dos alunos e a efetividade da abordagem didática empregada, além de fornecer subsídios para eventuais ajustes metodológicos. Assim, a estruturação dessas etapas visa tornar o ensino mais significativo, promovendo a compreensão ativa dos conceitos e incentivando a participação dos alunos no processo de aprendizagem.

5.4 Local de aplicação e público-alvo

O produto educacional deste trabalho foi aplicado na sala de aula da Escola Canadense Maple Bear, localizada no bairro Lagoa Sapiroanga, em Fortaleza.

Figura 30 – Escola canadense Maple Bear em Fortaleza.



Fonte: Encontra Fortaleza. (Disponível em: <https://www.encontrafortaleza.com/local/maple-bear-fortaleza-fortaleza-ce>). Acesso em: 20 jul. 2025.

O público-alvo foram alunos do ensino médio – chamado de “high school”, que já viram leis de Newton nos anos anteriores. Desse modo, o material foi aplicado em turmas da 2ª e 3ª série do ensino médio – chamados, respectivamente, de Year 11 e Year 12.

5.5 Aplicação do produto educacional

5.5.1 Aula 01 – Avaliação de conhecimentos prévios

Nessa aula, foi aplicado um questionário de conhecimentos prévios nas turmas de segundo ano e terceiro ano do ensino médio, tendo em vista que os alunos já viram o conteúdo abordado nos anos passados, segundo a BNCC. As questões aplicadas visaram os

conhecimentos conceituais dos alunos sobre lei de Newton, força de atrito e lei de Hooke. Para isso, usou-se questões do Enem e outras que foram alavancadas pelas competências e habilidades exigidas nesse nível da educação básica.

Os quadros a seguir mostram uma síntese de como foi feita a divisão dos assuntos abordados na avaliação, as palavras-chave (sublinhadas) e os respectivos gabaritos.

A questão 1, conforme mostra no Quadro 2, aborda o princípio da inércia de forma conceitual.

Quadro 2 – Questão conceitual de princípio da inércia.

	Indique a alternativa que está em <u>desacordo</u> com o <u>princípio da inércia</u> .
	e) Uma partícula pode ter movimento acelerado sob força resultante nula.

Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 140).

A questão 2, conforme mostra no Quadro 3, também aborda o princípio da inércia e traz uma abordagem histórica.

Quadro 3 – Questão conceitual e histórica do princípio da inércia (Enem 2011, prova cinza, questão 88).

	Segundo Aristóteles, uma vez deslocados de seu local natural, os elementos tendem espontaneamente a retornar a ele, realizando <u>movimentos</u> chamados de <u>naturais</u> .
	Já em um <u>movimento</u> denominado <u>forçado</u> , um corpo só permaneceria em movimento enquanto houvesse uma causa para que ele ocorresse. Cessada essa causa, o referido elemento entraria em <u>repouso</u> ou adquiriria um <u>movimento natural</u> . Posteriormente, <u>Newton confrontou a ideia de Aristóteles</u> sobre o movimento forçado através da <u>lei</u> da
	a) inércia.

Fonte: Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/avaliacao-e-exames-educacionais/enem/provas-e-gabaritos>). Acesso em: 21 jul. 2025.

A questão 3, conforme mostra no Quadro 4, aborda o princípio fundamental da dinâmica.

Quadro 4 – Questão de princípio fundamental da dinâmica.

	<p>O que a <u>segunda Lei de Newton</u>, conhecida como princípio fundamental da <u>dinâmica</u>, afirma sobre a relação entre a <u>força resultante</u>, a <u>massa</u> e a <u>aceleração</u> de um corpo?</p> <p>b) Afirma que se um corpo tem massa constante, a aceleração adquirida por ele é diretamente proporcional à força resultante aplicada.</p>
--	--

Fonte: Elaborado pelo autor.

A questão 4, conforme mostra no Quadro 5, aborda a força de atrito estático de no caminhar humano.

Quadro 5 – Questão de força de atrito (Enem 2013, prova azul, questão 76).

	<p>Uma pessoa necessita da <u>força de atrito</u> em seus pés para se deslocar sobre uma superfície. Logo, uma <u>pessoa que sobe uma rampa em linha reta</u> será auxiliada pela <u>força de atrito exercida pelo chão</u> em seus pés.</p> <p>Em relação ao movimento dessa pessoa, quais são a <u>direção</u> e o <u>sentido</u> da força de atrito mencionada no texto?</p> <p>c) Paralelo ao plano e no mesmo sentido do movimento.</p>
--	--

Fonte: Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/avaliacao-e-exames-educacionais/enem/provas-e-gabaritos>). Acesso em: 21 jul. 2025.

A questão 5, conforme mostra no Quadro 6, aborda a força elástica e lei de Hooke em uma mola.

Quadro 6 – Questão de força elástica e lei de Hooke.

	<p>A imagem a seguir mostra uma <u>mola</u> presa a uma parede sendo <u>esticada</u> por uma mão. Considerando a <u>Lei de Hooke</u>, que relaciona a força elástica com a deformação Δx da mola, assinale a alternativa correta.</p> <p>a) A força elástica é diretamente proporcional à deformação da mola.</p>
--	--

Fonte: Elaborado pelo autor.

A questão 6, conforme mostra no Quadro 7, aborda os limites da lei de Hooke e a não linearidade em diferentes molas.

Quadro 7 – Questão de lei de Hooke e molas não lineares.

As molas estão presentes em diversas aplicações tecnológicas, como amortecedores de veículos, colchões ortopédicos e equipamentos industriais. Em muitas situações, o comportamento da mola pode ser descrito pela Lei de Hooke, que estabelece uma relação entre a força elástica (F) e deformação (x). No entanto, algumas molas apresentam comportamento diferente, em que a relação entre força e deformação não obedecem a essa lei.

O gráfico abaixo representa a relação entre força e deformação para três tipos de molas: uma linear, uma não linear macia e uma não linear dura.

b) A mola não linear macia apresenta um crescimento de força menor do que a mola linear a partir de certo ponto, indicando que sua constante elástica diminui conforme a deformação aumenta.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Questão 7, conforme mostra no Quadro 8, aborda lei de Hooke e associação de molas em série e em paralelo.

Quadro 8 – Questão de lei de Hooke e associação de molas.

Marque a alternativa correta sobre associações de molas.

c) Na associação em paralelo, a constante elástica equivalente é a soma das constantes individuais.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Questão 8, conforme mostra no Quadro 9, aborda o princípio da ação e da reação e lei de Hooke em um sistema composto por duas massas e uma mola.

Quadro 9 – Questão de princípio da ação e da reação e lei de Hooke.

Considere que dois carrinhos A e B, com massas respectivamente iguais a 0,5 kg e 1,0 kg, estão conectados por uma mola em uma superfície horizontal com atrito desprezível como mostra a figura a seguir.

Nesta situação, a mola está esticada e obedece a lei de Hooke.

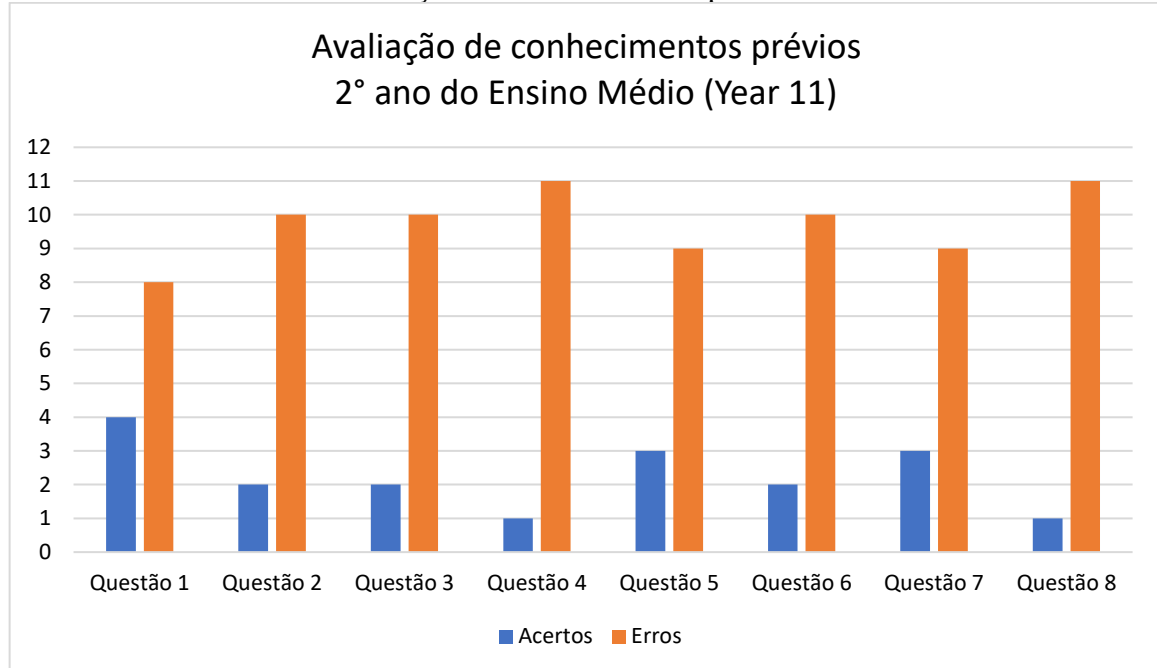
Quando soltos, os carrinhos são puxados um em direção ao outro. Sobre as forças que um exerce sobre o outro, é correto afirmar que:

d) ambos exercem forças de mesma intensidade, mas em sentidos opostos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A aplicação da avaliação de conhecimentos prévios foi feita com 12 alunos do 2º ano do ensino médio. Após isso, foi analisado, de forma quantitativa, os acertos e os erros da turma, gerando os resultados mostrados no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Resultado da avaliação de conhecimentos prévios no 2º ano do ensino médio.



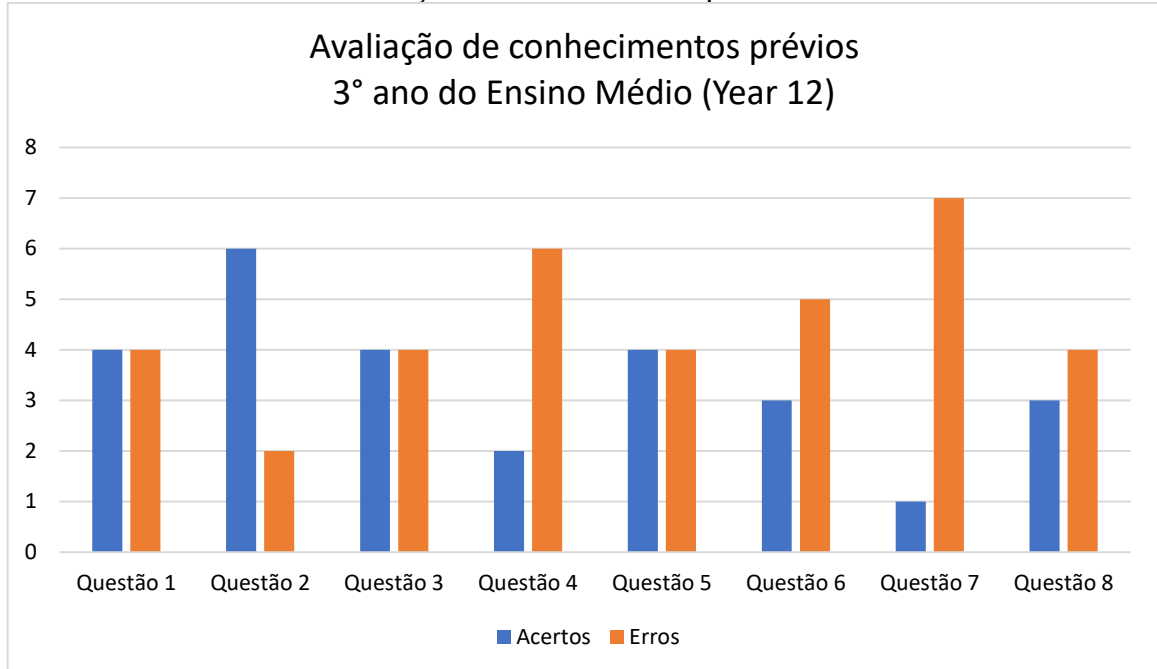
Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise do Gráfico 1 mostra a presença de lacunas conceituais e dificuldades específicas entre os estudantes antes da aplicação da sequência didática. Conforme evidenciado pela baixa taxa de acertos em certas questões, os alunos demonstram uma compreensão frágil de tópicos cruciais da Mecânica Clássica.

A partir da análise do gráfico, observa-se que as questões que abordam a força de atrito (questão 4) e o princípio da ação e reação (questão 8) foram as que apresentaram o menor número de respostas corretas – somente 1 aluno em cada, apoiando a literatura que aponta esses temas como desafios persistentes no ensino de Física. Além disso, as questões que exigiam a conexão do conceito físico com sua representação gráfica e a análise da relação de proporcionalidade também se mostraram problemáticas para a maioria dos estudantes.

A mesma avaliação foi aplicada na 3º ano do ensino médio. Essa turma é reduzida e conta com apenas 8 alunos, visto que, neste ano, foi a primeira a ser formada na educação básica da instituição. Desse modo, gerou-se a seguinte Gráfico 2.

Gráfico 2 – Resultado da avaliação de conhecimentos prévios no 3º ano do ensino médio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise do Gráfico 2 revela a presença de lacunas conceituais e dificuldades específicas, assim como observado na outra turma. A partir dos dados, observa-se que as questões que abordam a força de atrito (questão 4) e associação de molas (questão 7) foram as que apresentaram o menor número de respostas corretas – 2 alunos em cada, confirmando a literatura que aponta esses temas como desafios persistentes no ensino de Física.

Esses resultados coletados no ensino médio não apenas confirmam a hipótese inicial de que o ensino tradicional pode levar a uma aprendizagem superficial e descontextualizada, mas também reforçam a necessidade de uma intervenção didática que utilize metodologias ativas. Portanto, a evidência dessas concepções alternativas e dificuldades serve como a principal justificativa para a aplicação do produto educacional, que visa a confrontar esses erros e construir um entendimento mais sólido e significativo dos conceitos.

5.5.2 Aula 2 – Primeira aplicação

A primeira aplicação do produto educacional consistiu em analisar o conceito de força e a lei de Hooke. Essa aplicação durou 1 aula (50 minutos), na qual houve uma revisão prévia para relembrar as ideias aprendidas na 1ª série do ensino médio.

5.5.2.1 Materiais necessários

Os materiais necessários para essa primeira aplicação do produto educacional estão listados no Quadro 10.

Quadro 10 – Lista de materiais necessários para o primeiro experimento.

Lista de materiais – 1º experimento
• Molas helicoidais cilíndricas de caderno
• Arruelas
• Balança de precisão
• Gancho auxiliar maior
• Fita métrica
• Palito de madeira
• Ganchos externos principais
• Fita crepe
• Torre sustentação feita de madeira com régua fixada

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para exemplificar melhor o que foi utilizado nesse experimento, a Figura 31 mostra os materiais listados na Quadro 9.

Figura 31 – Materiais utilizados na primeira aplicação do produto educacional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5.2.2 Objetivo geral da primeira aplicação

A aplicação desta parte da sequência didática, que envolveu a lei de Hooke, teve como objetivo principal promover a compreensão conceitual e quantitativa da relação entre força elástica e deformação, a partir de experimentos simples com materiais acessíveis. A proposta buscou tornar os conceitos físicos mais próximos da realidade dos alunos, favorecendo a aprendizagem significativa conforme a teoria de David Ausubel.

5.5.2.3 Objetivos específicos da primeira aplicação

Entre os objetivos específicos da atividade, destacam-se:

- a) compreender o conceito de força elástica como força restauradora que surge em materiais deformáveis;
- b) relacionar a deformação de um corpo elástico à força aplicada, por meio da equação da lei de Hooke;
- a) identificar experimentalmente o comportamento linear e não linear de molas e elásticos em regimes de deformação;
- b) estimular a análise gráfica da força em função da deformação, interpretando a constante elástica a partir da inclinação da curva;
- c) desenvolver habilidades de observação, coleta e análise de dados em situações experimentais;
- d) promover o trabalho colaborativo e a discussão em grupo sobre os resultados obtidos;
- e) incentivar a formulação de hipóteses e o raciocínio lógico, contribuindo para o desenvolvimento da autonomia intelectual dos estudantes.

A atividade foi estruturada para que os alunos manipulassem os materiais e coletassem dados sobre a deformação de um sistema sob ação de diferentes pesos. Em seguida, os resultados foram representados em gráficos e discutidos coletivamente, promovendo a construção dos conceitos por meio da interação entre teoria e prática. A proposta também teve o cuidado de respeitar o ritmo de aprendizagem dos alunos, valorizando seus conhecimentos prévios e criando oportunidades para a diferenciação progressiva dos conceitos de força, deformação e constante elástica.

5.5.2.4 Descrição da aula 2

Inicialmente, foi dado um conteúdo de revisão sobre o conceito de força para os alunos, mostrando o que essa grandeza física é capaz de fazer nos corpos. Após isso, foi apresentado o conceito de força elástica e perguntado onde ela está presente no cotidiano.

Por seguinte, mostrou-se uma mola aos alunos, perguntando-os para onde apontava a força que ela fazia quando era esticada. A indução desse pensamento tornou-se aliado para a construção da equação da força elástica, dizendo que essa era diretamente proporcional a deformação ou a compressão feita sobre ela. Nesse viés, foi apresentado a lei de Hooke, comentando-se também suas contribuições para a Ciência, e o conceito de constante elástica.

Logo em seguida, apresentou-se todo o kit da sequência didática, mostrando que a finalidade dele era calcular a constante elástica da mola apresentada. Em seguida, pediu-se para os alunos calcularem esse valor característico da mola, fixando-a no gancho da torre de sustentação feita de madeira e medindo a massa das arruelas com a balança de precisão, conforme mostra a Figura 32.

Figura 32 – Estudante colocando as arruelas na mola, após a medição das massas, e analisando a consequente deformação ocasionada por cada uma (3º ano do ensino médio).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O mesmo procedimento foi feito pelo 2º ano do ensino médio, conforme mostra a Figura 33.

Figura 33 – alunos do 2º ano do ensino médio debatendo sobre a deformação da mola.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As deformações na mola ocasionadas pelas arruelas foram observadas pelos alunos. Eles poderiam tanto observar pela fita métrica, quanto pela régua. O 3º ano, por exemplo, escolheu a segunda opção, como mostra a Figura 34.

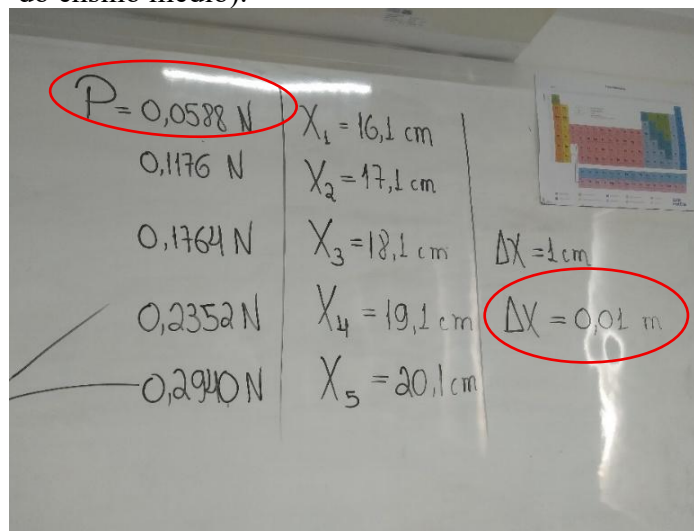
Figura 34 – Medição da deformação da mola feita pelos alunos do 3º ano do ensino médio com o auxílio da régua.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após isso, foi feita uma coleta de dados para construção do gráfico de força elástica em função da deformação da mola, como mostra a Figura 35.

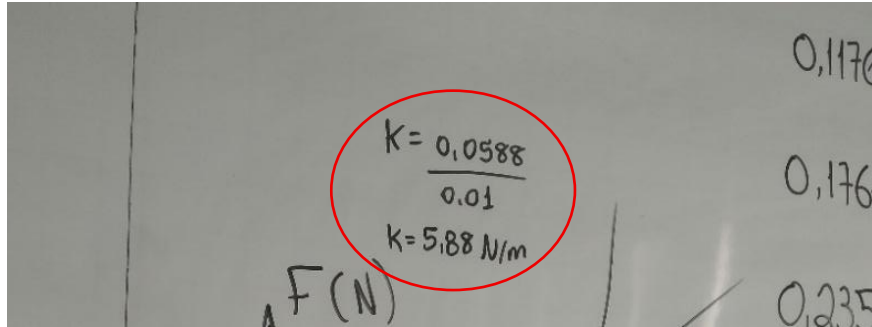
Figura 35 – Coleta de dados da força elástica e da posição da mola para medir a sua deformação (3º ano do ensino médio).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Depois disso, com a ajuda dos dados coletados, houve o cálculo da constante elástica da mola, conforme mostra a Figura 36.

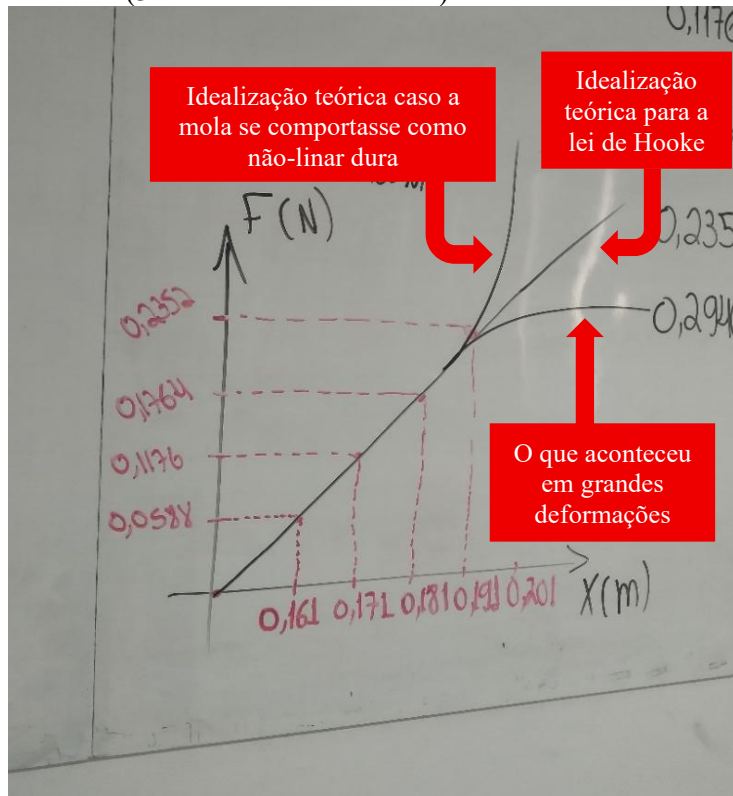
Figura 36 – Cálculo da constante da mola helicoidal feita pelos alunos do 3º ano do ensino médio.



Fonte: elaborado pelo autor.

Em seguida, considerando as posições de equilíbrio estático, foi feita a construção do gráfico de força elástica em função da deformação da mola. Foram considerados casos de pequenas e grandes deformações (feitas nos experimentos) e a idealização teórica para o caso de uma mola não-linear dura. Isso é mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Gráficos da força elástica em função da deformação para diferentes comportamentos da mola (3º ano do ensino médio).

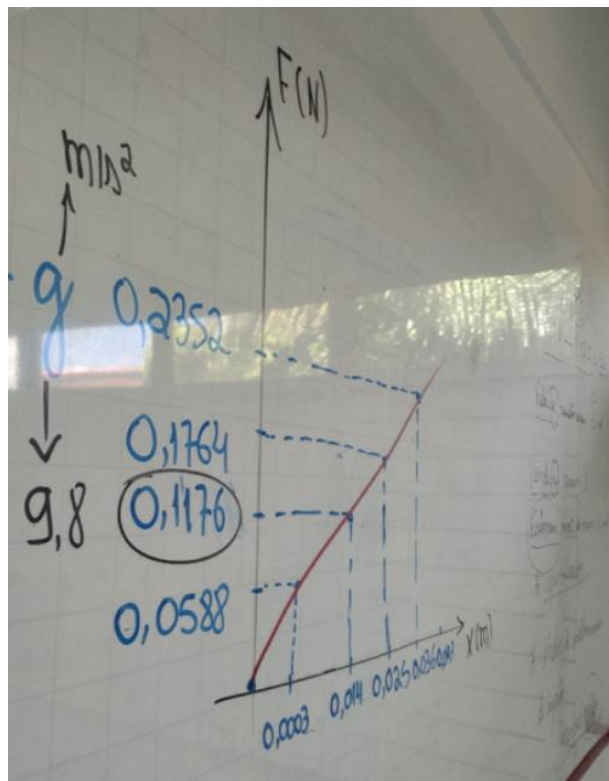


Fonte: Elaborado pelo autor.

Colocando-se mais peso na mola, notou-se que a força elástica não era diretamente proporcional a deformação. Ou seja, que ela tinha um comportamento não linear a partir de certo ponto, evidenciando que a lei de Hooke tem suas limitações. Na aula, explicou-se a diferença entre as molas lineares, não lineares duras e não lineares macias.

No 2º ano do ensino médio houve a construção do gráfico de força elástica em função da deformação da mola conforme mostra a seguinte Figura 38.

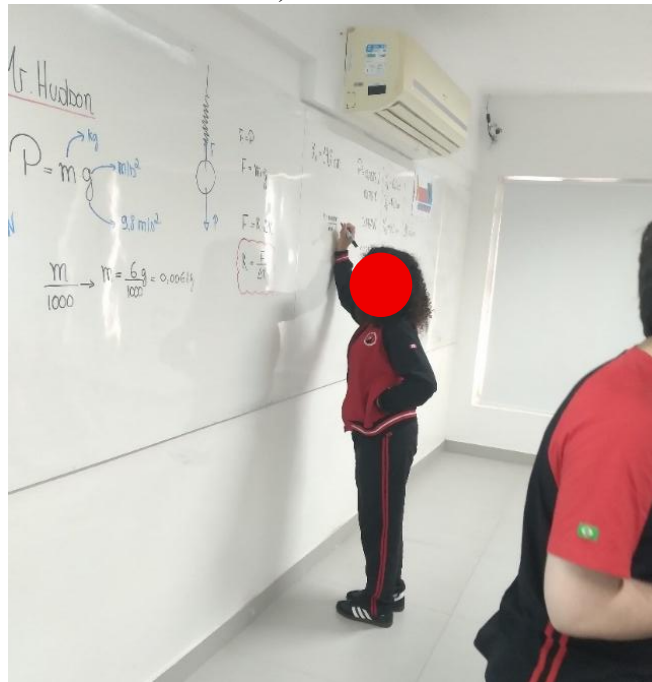
Figura 38 – Gráfico de força elástica em função da deformação construída no 2º ano do ensino médio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os alunos do 3º ano do ensino médio se engajaram bastante para encontrar o valor da constante elástica da mola, como mostra a Figura 39.

Figura 39 – Aluna fazendo as contas na lousa para encontrar o valor da constante elástica da mola (3º ano do ensino médio).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao final, como mostrado nas imagens, foi calculado pelos alunos que a constante elástica da mola estudada é de aproximadamente $5,88 \text{ N/m}$.

5.5.3 Aula 3 – Segunda aplicação

5.5.3.1 Objetivo geral

A aplicação envolvendo essa segunda prática teve como objetivo analisar o potencial de uma sequência didática envolvendo as leis de Newton e a associação de molas para desenvolver, nos estudantes do ensino médio, a capacidade de interpretar situações dinâmicas por meio da experimentação e da análise qualitativa dos conceitos físicos e das equações envolvidas nessa etapa, promovendo uma aprendizagem significativa e contextualizada com base na teoria de David Ausubel.

5.5.3.2 Objetivos específicos

Para os objetivos específicos da atividade, nota-se:

- a) reconhecer e aplicar os princípios das três leis de Newton em situações experimentais com blocos de madeira, caixa de papelão, elásticos e molas;
- b) investigar experimentalmente a relação entre força resultante, massa e aceleração;
- c) observar e interpretar o comportamento da força elástica em diferentes sistemas de associação de molas (em série e em paralelo);
- d) compreender como a constante elástica equivalente varia conforme o tipo de associação e relacioná-la com a aceleração de um sistema;
- e) analisar a direção e sentido da força de atrito entre superfícies sólidas nos diferentes contextos;
- f) verificar o qualitativamente o comportamento da força elástica em elásticos;
- g) estimular o raciocínio lógico e o trabalho colaborativo, por meio da manipulação experimental e da discussão dos resultados em grupo;
- h) valorizar a experimentação como recurso pedagógico no ensino de Física, aproximando os conceitos da realidade dos estudantes e promovendo uma aprendizagem duradoura.

5.5.3.3 Materiais necessários

Os materiais necessários para essa segunda aplicação do produto educacional estão listados no Quadro 10.

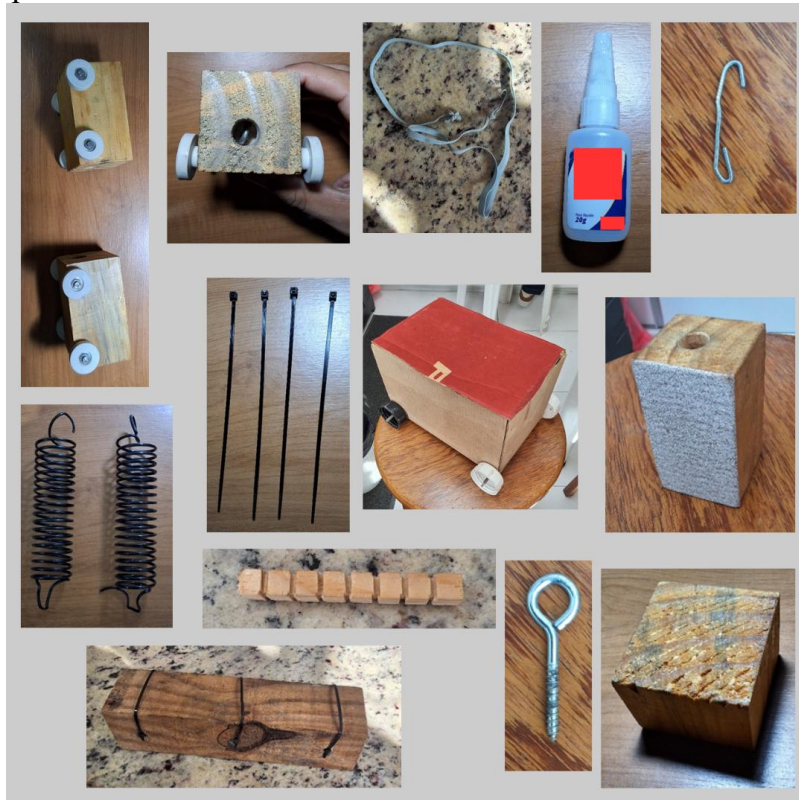
Quadro 11 – Lista de materiais necessários para o segundo experimento.

Lista de materiais – 2º experimento	
•	Carrinhos de madeira com rodinhas e ganchos internos
•	Ganchos principais internos
•	Bloco de madeira propriamente dito
•	Gancho auxiliar menor
•	Cola
•	Bloco de madeira com lixa
•	Carrinho de caixa de papelão com rodas garrafas PET fixadas com haste metálica
•	Cintas de nylon
•	Haste de madeira fracionada
•	Molas helicoidais cilíndricas de caderno
•	Elástico com gancho auxiliar
•	Anteparo de madeira
•	Bloco com lixa

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para exemplificar melhor o que foi utilizado nesse experimento, a Figura 40 mostra os materiais listados na Quadro 10.

Figura 40 – Materiais utilizados na segunda aplicação do produto educacional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5.3.4 Descrição da aula 3

Como feito na aula 2, foi dado um conteúdo de revisão sobre o conceito de associação de molas e sobre as três leis de Newton. Durante a aula, foi explicado a importância de Isaac Newton para a Ciência e apresentado diversas aplicações dos conteúdos de Mecânica no dia a dia.

Na sequência, falou-se sobre a força de atrito entre sólidos, sobre sua direção e sentido assim como sua dependência da reação normal e das rugosidades das superfícies em contato. Nesse sentido, apresentou-se o kit da sequência didática, indicando que a finalidade dele era compreender os conceitos da lei de Hooke já trabalhados, das associações de molas, do princípio da inércia, do princípio fundamental da dinâmica e do princípio da ação e da reação.

Primeiramente foi feita uma análise das forças resultantes, das acelerações dos carrinhos bem como a constante elástica equivalente do sistema através da associação em série das molas. A Figura 41 mostra essa investigação dos alunos.

Figura 41 – Aluno do 3º ano do ensino médio analisando as forças resultantes, as acelerações dos carrinhos bem como a constante elástica equivalente do sistema para duas molas de mesma constante associada em série.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, os alunos colocaram as mesmas molas associadas em paralelo e fizeram a mesma análise das variáveis dinâmicas, bem como a constante elástica equivalente do sistema, como mostra a Figura 42.

Figura 42 – Aluno do 2º ano do ensino médio analisando a forças resultantes, as acelerações dos carrinhos bem como a constante elástica equivalente do sistema para duas molas de mesma constante associada em série.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após isso, foi feita uma análise da direção, do sentido e da intensidade da força de atrito entre o carrinho de papelão e o bloco de madeira utilizando um elástico com gancho para maximizar a força resultante sobre o sistema, como mostra a Figura 43.

Figura 43 – Aluno do 2º ano do ensino médio utilizando um elástico para analisar o comportamento da força de atrito de um bloco de madeira sobre o carrinho de papelão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os alunos do 3º ano do ensino médio optaram por fazer diferentes configurações para analisar o atrito entre os blocos de madeira de diferentes massas e o carrinho de papelão, conforme mostra a Figura 44 a seguir.

Figura 44 – Alunos do 3º ano do ensino médio analisando o comportamento da força de atrito entre o carrinho de papelão e os blocos de madeira em diferentes configurações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, foi feita uma análise da ação e da reação para um sistema com vínculo de forças. Nessa investigação, o 2º ano do ensino médio decidiu colocar o sistema com molas associadas em série e carrinhos com massas aproximadamente iguais, porém, densidades diferentes, como mostra a Figura 45 a seguir.

Figura 45 – Alunos do 2º ano do ensino médio analisando a força de ação e de reação para um sistema com carrinhos de madeira e de papelão e molas associadas em série.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse caso estudado, notou-se que os carrinhos tinham deslocamentos aproximadamente iguais.

Essa análise também foi feita pelo 3º ano do ensino médio, como mostra a Figura 46 a seguir.

Figura 46 – Alunos do 3º ano do ensino médio analisando a força de ação e de reação para um sistema com carrinhos de madeira e de papelão e uma única mola.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em todos esses experimentos da terceira lei de Newton, foi-se mostrado que a força é a mesma, mesmo a massa dos carrinhos sendo diferente.

A Figura 47 mostra o momento que os alunos do 3º ano do ensino médio soltaram os carrinhos para analisar o seu deslocamento por ação da força elástica.

Figura 47 - Alunos do 3º ano do ensino médio soltando os carrinhos para analisar o seu deslocamento por ação da força elástica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, os resultados obtidos a partir da implementação do produto educacional nas turmas do High School da Escola Canadense Maple Bear serão apresentados e discutidos. Como a aplicação foi concluída em 4 aulas, cada uma delas será analisada.

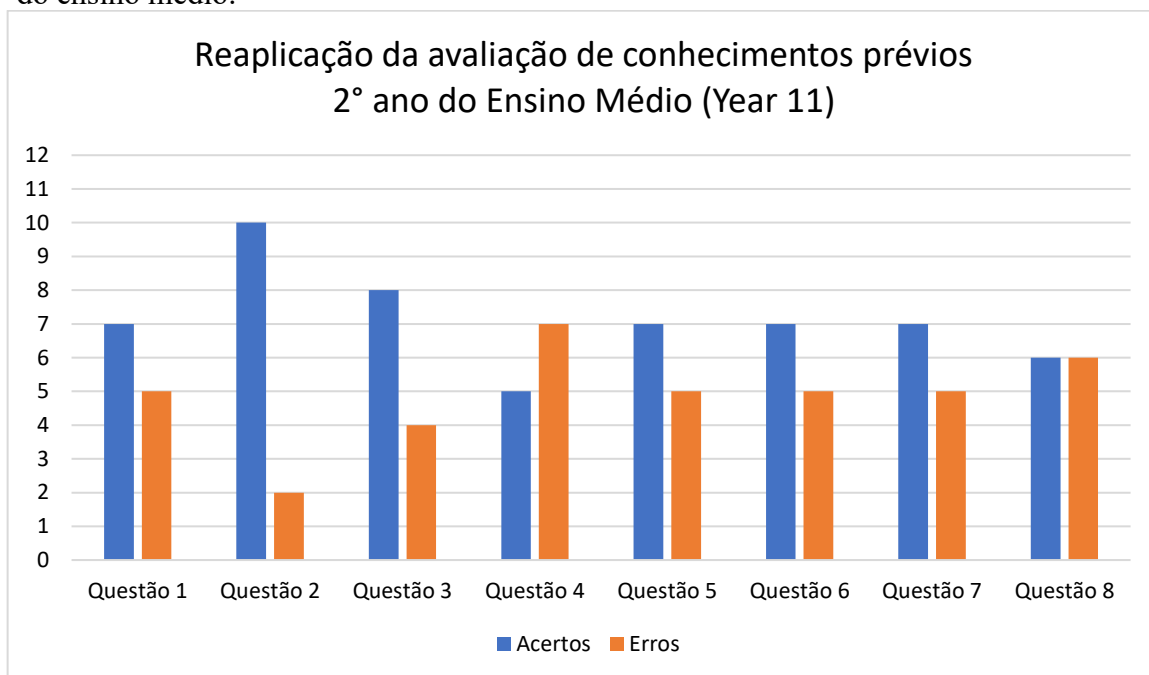
Com base nesses dados, nota-se que os alunos dessa instituição têm muita dificuldade com assuntos envolvendo leis de Newton e lei de Hooke. Como exemplo, percebeu-se que nas questões 4 e 8, somente 1 aluno marcou o item correto. De acordo com a avaliação de conhecimentos prévios, essas questões abordaram, respectivamente, força de atrito e terceira lei de Newton.

A explicação ficou evidente durante a aplicação do produto educacional, visto que os alunos acreditavam que o vetor força de atrito sempre apontava na direção contrária do movimento. Ainda, acreditavam que, se dois corpos de massas diferentes estivessem vinculados num sistema, o que tem mais massa faria mais força no corpo que tem menos massa.

As outras mais erradas, a saber, questões 2, 3 e 6, mostraram a dificuldade dos alunos na compreensão do significado físico das equações, assim como a análise gráfica envolvendo grandezas lineares e não lineares.

O Gráfico 3 a seguir mostra o resultado da reaplicação da avaliação de conhecimentos prévio no 2º ano do ensino médio, notando-se uma evolução no acerto do número de questões em comparação com a primeira aplicação.

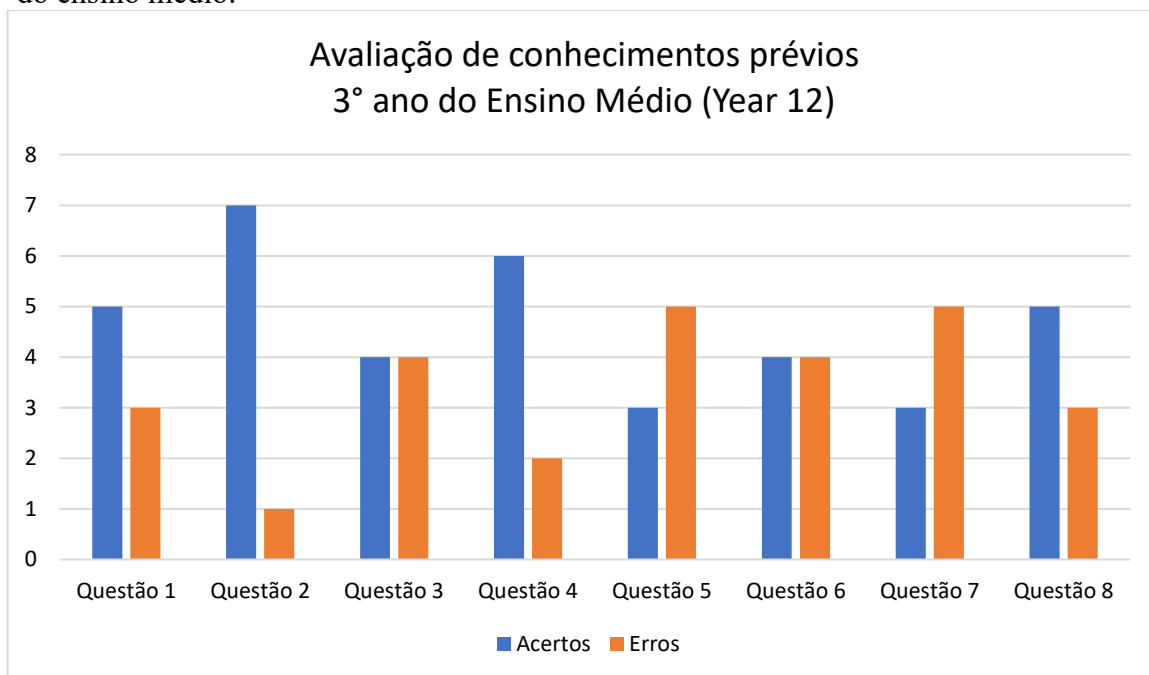
Gráfico 3 – Resultado da reavaliação da avaliação de conhecimentos prévios no 2º ano do ensino médio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A mesma avaliação de conhecimentos prévios foi reavaliada a 3ª série do ensino médio, obtendo os resultados conforme mostra a seguinte Gráfico 4.

Gráfico 4 – Resultado da reavaliação da avaliação de conhecimentos prévios no 2º ano do ensino médio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para essa turma, nota-se também uma evolução no acerto do número de questões em comparação com a primeira aplicação, mostrando a efetividade dos experimentos propostos no produto educacional.

Os dados obtidos ao longo da aplicação revelam não apenas a efetividade do experimento proposto na mediação da aprendizagem dos conceitos de força elástica e leis de Newton, mas também evidenciam aspectos importantes do processo ensino-aprendizagem, como o engajamento dos estudantes diante de uma atividade experimental contextualizada. Segundo Ausubel (2003), a aprendizagem significativa ocorre quando novos conhecimentos se conectam de forma substancial e não arbitrária à estrutura cognitiva prévia do aluno. Durante as atividades, foi possível observar que muitos estudantes reformularam suas concepções iniciais à medida que interagiam com os materiais e com os colegas, sinalizando a ocorrência de processos significativos de aprendizagem.

As falas espontâneas dos alunos durante as atividades também são indicativas desse processo. Em diversas situações, os estudantes passaram a empregar vocabulário mais técnico ao descrever os fenômenos observados, demonstrando apropriação gradual do conteúdo. Além disso, a manipulação concreta do experimento permitiu que os alunos confrontassem suas ideias prévias com os resultados obtidos, o que reforça o papel da experimentação no ensino de Física.

Um aspecto relevante foi a participação ativa da turma, inclusive de alunos que usualmente demonstram menor envolvimento em atividades expositivas tradicionais. Essa mudança de postura corrobora a importância de metodologias que valorizem o protagonismo do estudante e o uso de situações-problema, conforme indicam Zabala (1998) e Moreira (2011). Por outro lado, surgiram algumas dificuldades, especialmente na análise gráfica da força elástica em função da deformação para molas não-lineares, o que evidencia a necessidade de aprofundamento na leitura e interpretação de dados.

Por fim, destaca-se que o processo de aplicação também promoveu uma transformação na prática docente, ao permitir uma atuação mais mediadora e menos transmissiva, tendo em vista que os alunos montaram diversos experimentos com os materiais disponíveis. Essa mudança se alinha às diretrizes da BNCC, que orienta o desenvolvimento de competências como investigação, argumentação e comunicação científica no ensino de Ciências da Natureza.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como objetivo investigar o potencial de uma sequência didática, baseada na experimentação com materiais simples e acessíveis, para o ensino das leis de Newton e da lei de Hooke à luz da teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel. A proposta surgiu da necessidade de tornar o ensino da Mecânica Clássica mais próximo da realidade dos alunos do ensino médio, favorecendo a compreensão conceitual por meio da prática e da interação com fenômenos físicos diretamente aplicáveis.

A sequência foi aplicada em turmas do ensino médio, por meio de uma abordagem que contemplou o diagnóstico dos conhecimentos prévios, a realização de experimentos mediados pelo professor e uma avaliação posterior para verificar os avanços na aprendizagem. Os materiais utilizados — como caixas de papelão, blocos de madeira e espirais de caderno — permitiram a criação de situações-problema que exploraram de forma qualitativa e quantitativa os conceitos envolvidos nas equações.

Os resultados obtidos foram satisfatórios. A comparação entre os questionários aplicados antes e depois da intervenção evidenciou uma melhora no desempenho dos estudantes, indicando que a proposta contribuiu para o desenvolvimento de uma compreensão mais sólida e estruturada dos conteúdos abordados. Além disso, observou-se um maior envolvimento dos alunos nas atividades, com participação ativa, questionamentos e interesse pelos temas trabalhados.

Essas aplicações reforçam a importância da experimentação no ensino de Física e demonstram que é possível desenvolver práticas pedagógicas significativas mesmo em contextos com recursos limitados. O uso de materiais simples, aliado a um planejamento intencional e fundamentado em teorias da educação, mostrou-se eficaz na promoção da aprendizagem.

Como perspectivas para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação da proposta para outras séries do ensino básico, bem como a adaptação da sequência para diferentes realidades escolares. Também pode-se investigar o impacto de estratégias complementares, como o uso de tecnologias digitais, simulações computacionais ou outras metodologias, a fim de enriquecer ainda mais a abordagem adotada.

Através do processo de aplicação e com as análises qualitativas e quantitativas dos dados obtidos, conclui-se que a sequência didática elaborada cumpriu seus objetivos, contribuindo para o ensino mais significativo e contextualizado da Física. Espera-se que este

trabalho possa servir de referência para outros professores da área, incentivando práticas que valorizem o protagonismo do aluno, o vínculo entre teoria e prática e o compromisso com uma educação científica de qualidade.

REFERÊNCIAS

- ARANHA, N.; JUNIOR, J. M. O.; BELLIO, L. O.; JUNIOR, W. B. A lei de Hooke e as molas não-lineares, um estudo de caso. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s.l.], v. 38, n. 4, p. e4305, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/RBGtKVzKLY99WR8VPS98zLw/>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- ARAÚJO, M. S. T; ABIB, M. L. V. S. Atividades experimentais no ensino de física: Diferentes Enfoques, Diferentes Finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s.l.], v. 25, n. 2, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/PLkjm3N5KjnXKgDsXw5Dy4R/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 05 de jun. 2025.
- DOCA, R. H.; BISCUOLA, J. G.; BÔAS, N. V. **Tópicos de física**. 21. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**, 2018. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf. Acesso em: 22 fev. 2025.
- BRASIL. Ministério da Educação. **PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**, 2002. Disponível em: <https://portal.mec.gov.br/component/tags/tag/pcn>. Acesso em: 23 fev. 2025.
- BRASIL. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **Exame Nacional do Ensino Médio (2011)**. Brasília: INEP, 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/avaliacao-e-exameseducacionais/enem/provas-e-gabaritos>. Acesso em: 19 jun. 2025.
- BRASIL. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **Exame Nacional do Ensino Médio (2013)**. Brasília: INEP, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/avaliacao-e-exames-educacionais/enem/provas-e-gabaritos>. Acesso em: 19 jun. 2025.
- YAMAMOTO, K.; FUKU, L. F. **Física para o ensino médio**. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2016.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentals of physics extended**. 9. ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- MENEZES, L. S. **Sequência didática para aprendizagem ativa das leis de Newton**. 2016. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/6412>. Acesso em: 25 de fev. 2025.
- MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa: a teoria e textos complementares**. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

NITSCHKE, F. E. A. **Lei de Hooke e conservação de energia: uma proposta experimental aplicada ao primeiro ano do ensino médio**. 2019. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019. Disponível em: <https://www1.fisica.org.br/mnpef/lei-de-hooke-e-conserva%C3%A7%C3%A3o-de-energia-uma-proposta-experimental-aplicada-ao-primeiro-ano-do-ensino>. Acesso em: 22 fev. 2025.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2013.

PEREIRA, V. O. **Elaboração e avaliação de um material instrucional baseado na teoria da aprendizagem significativa para o ensino das leis de newton e de tópicos de cinemática no ensino médio**. 2016. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016. Disponível em: <https://ensinodefisica.ufes.br/pt-br/pos-graduacao/PPGEnFis/detalhes-da-tese?id=9920>. Acesso em: 24 de fev. 2025.

UGALDE, M. C. P.; ROWEDER, C. Sequência didática: uma proposta metodológica de ensino aprendizagem. **Educitec – Revista de Estudos e Pesquisas sobre Ensino Tecnológico**, Manaus, v. 6, n. especial, p. e99220, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.31417/educitec.v6ied.especial.992>. Acesso em: 26 mai. 2025.

SASSERON, L. H. Alfabetização científica, ensino por investigação e argumentação: relações entre ciências da natureza e escola. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v.17, n. especial, p. 49-67, nov. 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/epec/a/K556Lc5V7Lnh8QcckBTTMcq/?lang=pt>. Acesso em 26 mai. 2025.

SOUSA, M. L.; AGUIAR, M. D. A história do ensino de física no brasil: problemas e desafios. In: **CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO**, 6., 2019, Fortaleza. Anais [...]. Campina Grande: Realize, 2019. Disponível em: https://_dcmx.9c1c5777875a.conedu.com.br/artigo/visualizar/57984. Acesso em: 15 mai. 2025.

TELLES, F. T. **Ensino por investigação para o estudo das leis de newton no ensino fundamental**. 2020. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Fluminense, Goytacazes. 2020. Disponível em: <https://portal1.iff.edu.br/o-iffuminense/pesquisa/pos-graduacao-stricto-sensu/mestrado-nacional-profissional-em-ensino-de-fisica/projetos-e-dissertacoes-defendidas/dissertacoes-defendidas/fabio-togneri-telles>. Acesso em 22 fev. 2025.

ZABALA, A. **A prática educativa: como ensinar**. Porto Alegre: Artmed, 1998. 224p.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE CONHECIMENTOS PRÉVIOS



Questionário sobre Leis de Newton e Lei de Hooke – 2º e 3º ano do ensino médio

1. Indique a alternativa que está em desacordo com o princípio da inércia (Doca; Biscuola; Bôas, 2012).

- a) A velocidade vetorial de uma partícula só pode ser variada se esta estiver sob a ação de uma força resultante não nula.
- b) Se a resultante das forças que agem em uma partícula é nula, dois estados cinemáticos são possíveis: repouso ou movimento retilíneo e uniforme.
- c) Uma partícula livre da ação de uma força externa resultante é incapaz de vencer suas tendências inerciais.
- d) Numa partícula em movimento circular e uniforme, a resultante das forças externas não pode ser nula.
- e) Uma partícula pode ter movimento acelerado sob força resultante nula.

2. Segundo Aristóteles, uma vez deslocados de seu local natural, os elementos tendem espontaneamente a retornar a ele, realizando movimentos chamados de naturais.

Já em um movimento denominado forçado, um corpo só permaneceria em movimento enquanto houvesse uma causa para que ele ocorresse. Cessada essa causa, o referido elemento entraria em repouso ou adquiriria um movimento natural. Posteriormente, Newton confrontou a ideia de Aristóteles sobre o movimento forçado através da lei da (Brasil, 2011)

- a) inércia.
- b) ação e reação.
- c) gravitação universal.
- d) conservação de massa.

e) conservação da energia.

3. O que a segunda lei de Newton, conhecida como princípio fundamental da dinâmica, afirma sobre a relação entre a força resultante, a massa e a aceleração de um corpo?

- a) Afirma que se um corpo tem massa constante, a aceleração adquirida por ele é inversamente proporcional à força resultante aplicada.
- b) Afirma que se um corpo tem massa constante, a aceleração adquirida por ele é diretamente proporcional à força resultante aplicada.
- c) Afirma que se um corpo tem massa variável, a aceleração adquirida por ele é inversamente proporcional à força resultante aplicada.
- d) Afirma que se um corpo tem massa variável, a aceleração adquirida por ele não tem relação com a força resultante aplicada.
- e) Afirma que se um corpo tem massa constante, a aceleração adquirida por ele é indefinida em relação a força resultante aplicada.

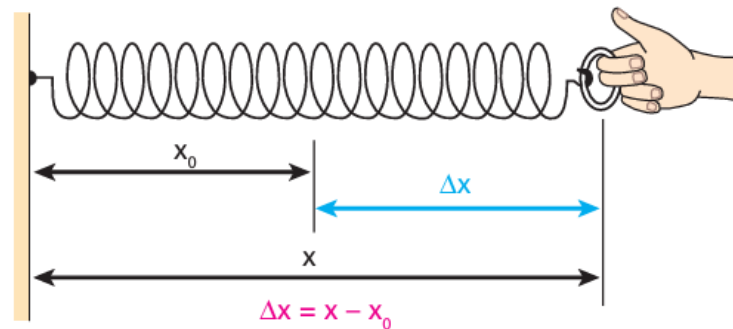
4. Uma pessoa necessita da força de atrito em seus pés para se deslocar sobre uma superfície. Logo, uma pessoa que sobe uma rampa em linha reta será auxiliada pela força de atrito exercida pelo chão em seus pés (Brasil, 2013).

Em relação ao movimento dessa pessoa, quais são a direção e o sentido da força de atrito mencionada no texto?

- a) Perpendicular ao plano e no mesmo sentido do movimento.
- b) Paralelo ao plano e no sentido contrário ao movimento.
- c) Paralelo ao plano e no mesmo sentido do movimento.
- d) Horizontal e no mesmo sentido do movimento.
- e) Vertical e sentido para cima.

5. A imagem a seguir mostra uma mola presa a uma parede sendo esticada por uma mão. Considerando a lei de Hooke, que relaciona a força elástica com a deformação Δx da mola, assinale a alternativa correta.

Figura 1 – Mola sendo deformada por uma força externa.

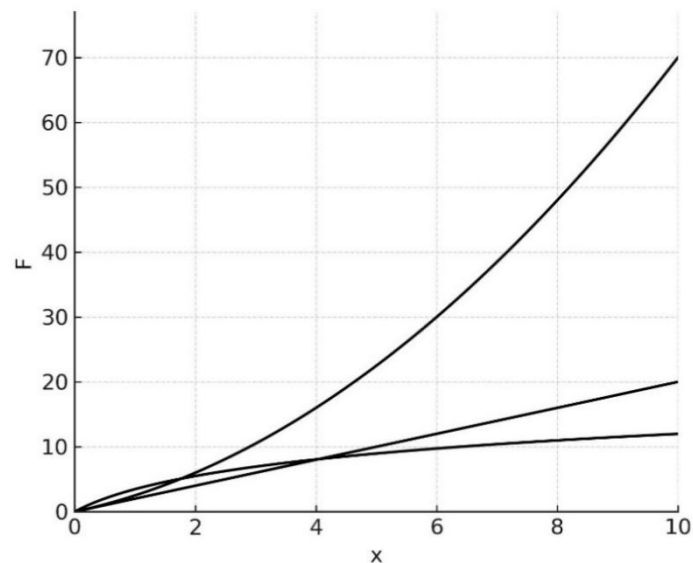


Fonte: Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 155).

- a) A força elástica é diretamente proporcional à deformação da mola.
- b) A força elástica é inversamente proporcional à deformação da mola.
- c) A força elástica é constante, independentemente da deformação da mola.
- d) A força elástica depende apenas da massa do corpo preso à mola.
- e) A força elástica atua sempre no mesmo sentido da deformação da mola.

6. As molas estão presentes em diversas aplicações tecnológicas, como amortecedores de veículos, colchões ortopédicos e equipamentos industriais. Em muitas situações, o comportamento da mola pode ser descrito pela lei de Hooke, que estabelece uma relação entre a força elástica (F) e deformação (x). No entanto, algumas molas apresentam comportamento diferente, em que a relação entre força e deformação não obedecem a essa lei. O gráfico abaixo representa a relação entre força e deformação para três tipos de molas: uma linear, uma não linear macia e uma não linear dura.

Figura 2 – Comportamento do gráfico da força em função da deformação nas molas lineares e não-lineares.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na análise do comportamento dessas molas, assinale a alternativa correta:

- A mola linear apresenta um comportamento em que a força aplicada cresce exponencialmente com a deformação.
- A mola não linear macia apresenta um crescimento de força menor do que a mola linear a partir de certo ponto, indicando que sua constante elástica diminui conforme a deformação aumenta.
- A mola não linear dura apresenta um crescimento de força menos acentuado do que a mola linear, indicando que sua rigidez diminui com a deformação.
- Todas as molas representadas no gráfico obedecem à lei de Hooke, pois a força elástica é sempre diretamente proporcional à deformação.
- A mola não linear macia e a mola linear apresentam o mesmo comportamento, pois ambas possuem uma constante elástica fixa.

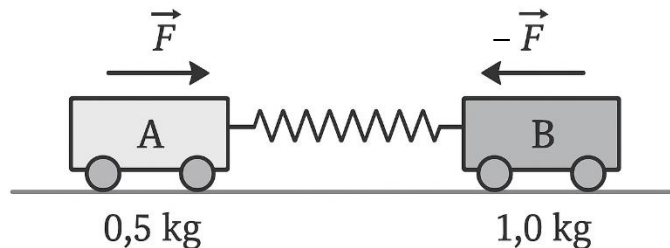
7. Marque a alternativa correta sobre associações de molas.

- Na associação em série, a constante elástica equivalente é maior do que a de cada mola individual.
- Na associação em paralelo, as molas compartilham a mesma força aplicada.

- c) Na associação em paralelo, a constante elástica equivalente é a soma das constantes individuais.
- d) Na associação em série, todas as molas sofrem a mesma deformação.
- e) Na associação em paralelo, o inverso da constante elástica equivalente é a soma dos inversos das constantes individuais.

8. Considere que dois carrinhos A e B, com massas respectivamente iguais a 0,5 kg e 1,0 kg, estão conectados por uma mola em uma superfície horizontal com atrito desprezível como mostra a figura a seguir.

Figura 2 – Carrinhos de massas diferentes ligados por uma mola que obedece a lei de Hooke.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta situação, a mola está esticada e obedece a lei de Hooke.

Quando soltos, os carrinhos são puxados um em direção ao outro. Sobre as forças que um exerce sobre o outro, é correto afirmar que:

- a) o carrinho de A puxa o carrinho B com uma força maior.
- b) o carrinho de A puxa o carrinho B com uma força menor.
- c) apenas o carrinho A sofre força do elástico.
- d) ambos exercem forças de mesma intensidade, mas em sentidos opostos.
- e) o carrinho B, por ter o dobro da massa do carrinho A, puxa-o com o dobro da força.

APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 43**

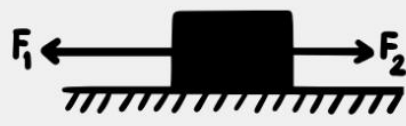
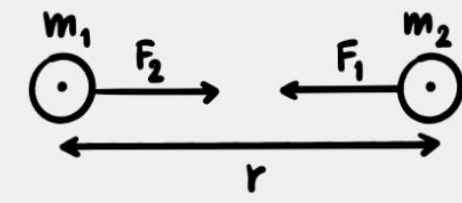
HUDSON AGUIAR DE SOUZA

PRODUTO EDUCACIONAL

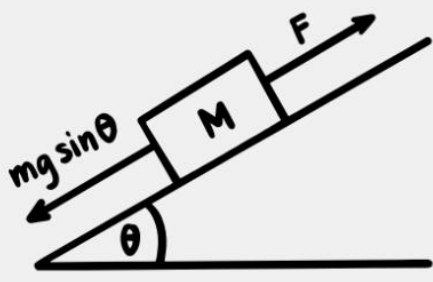
**UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA ENVOLVENDO LEIS DE NEWTON E LEI DE
HOOKE À LUZ DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA**

FORTALEZA

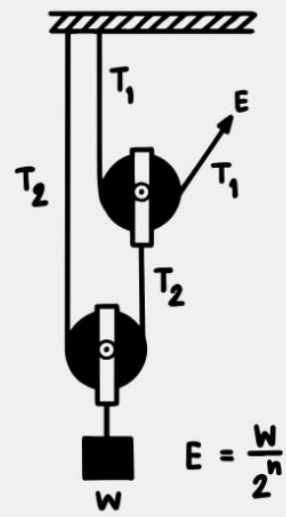
2025



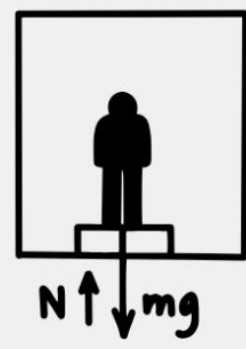
$$\Sigma F = F_1 - F_2$$



$$F = mg \sin \theta$$



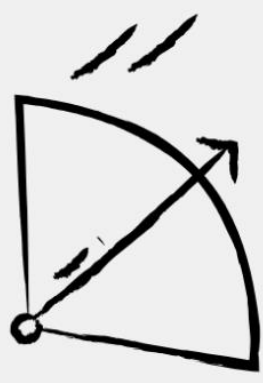
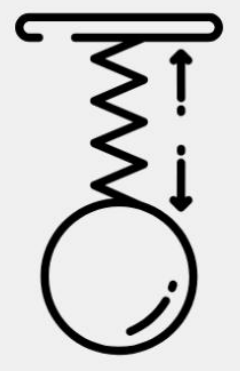
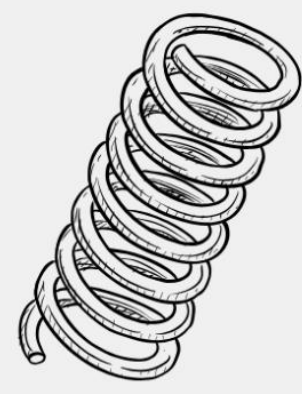
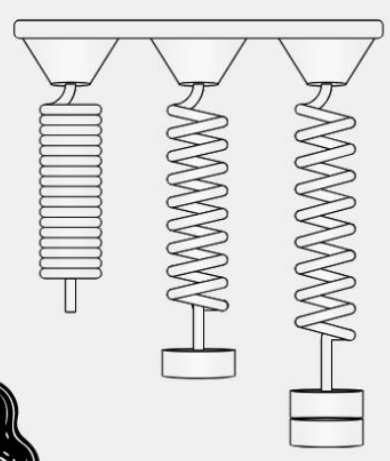
$$E = \frac{W}{2}$$



Leis de Newton e Lei de Hooke

Uma sequência de experimentos

Professor: Hudson Aguiar de Souza
Orientador: Nildo Loiola Dias



Prezado(a) docente,

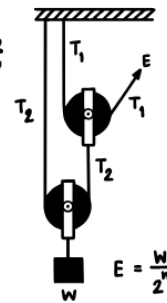
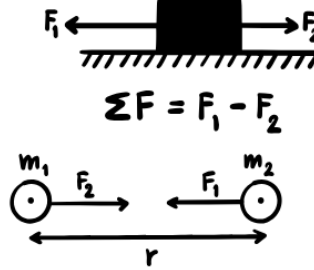
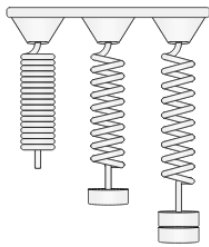
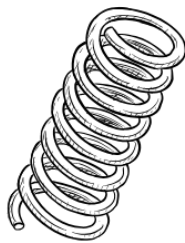
É com grande satisfação que apresento o produto educacional desenvolvido no âmbito de minha pesquisa de mestrado. A proposta aqui detalhada é uma sequência didática pensada como uma ferramenta prática e acessível para o ensino das leis de Newton e da lei de Hooke na educação básica.

A sequência foi elaborada com materiais de baixo custo, como caixas de papelão, blocos de madeira e elásticos, demonstrando que é possível realizar experimentos de alta relevância pedagógica sem a necessidade de grandes laboratórios. A fundamentação teórica baseia-se na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, com o objetivo de promover uma conexão duradoura entre os novos conceitos e o conhecimento prévio dos alunos.

Conforme demonstrado pelos resultados da pesquisa, a aplicação dessa sequência didática favoreceu o engajamento dos estudantes e contribuiu para uma compreensão mais sólida dos conceitos e equações. Espero que este material seja um recurso valioso em sua prática pedagógica, oferecendo uma alternativa ao ensino tradicional e incentivando o desenvolvimento de habilidades de investigação e de análise crítica em seus alunos.

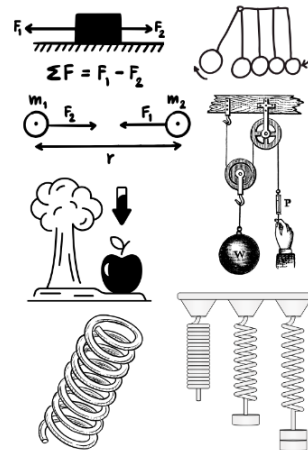
Que esta proposta didática sirva de inspiração para tornar a Física ainda mais dinâmica e significativa em sua sala de aula.

Com os melhores cumprimentos, Hudson.



Prezado docente da educação básica, neste produto educacional serão apresentados uma série de experimentos a fim de melhorar o entendimento dos discentes sobre as leis de Newton e a lei de Hooke. Seguindo os moldes da BNCC, esses conteúdos são abordados no primeiro ano do ensino médio, normalmente, na ordem a seguir:

- Introdução à Física;
- Cinemática Escalar;
- Cinemática Vetorial;
- Dinâmica;
- Estática.



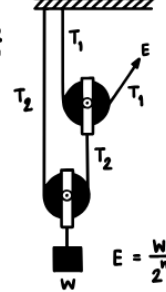
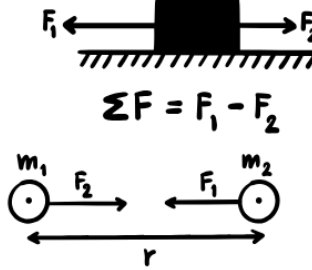
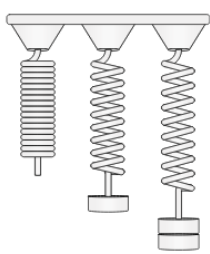
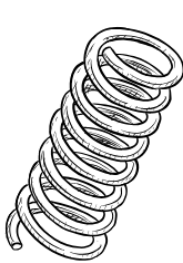
Como você já deve saber, a dinâmica é um ramo da Mecânica que analisa os movimentos levando em conta as causas que os originam e os alteram. Nessa área da Física, são estudadas as leis que descrevem como os movimentos acontecem, envolvendo noções como massa, força e energia, entre outras. No primeiro ano do ensino médio, aborda-se a Mecânica Clássica, fundamentada nas ideias de Galileu e Newton.

Essa sequência didática pode ser aplicada preferencialmente no segundo e terceiro anos do ensino médio, tendo em vista que os alunos já viram o conteúdo de dinâmica. No caso de aplicação regular (primeiro ano), o momento ideal será após a abordagem dos conteúdos de leis de Newton e suas aplicações. Estas, por sua vez, incluem a lei de Hooke. Nesse sentido, para melhor guiar os alunos durante os experimentos, serão propostas perguntas norteadoras em cada etapa.

Experimentos 1: Determinação da constante elástica de uma mola e a validade da lei de Hooke.

Professor, nesse primeiro experimento iremos **calcular a constante elástica de uma mola helicoidal cilíndrica de caderno**. Diga aos alunos que é assim que os cientistas podem fazer em laboratórios.

Aqui estão os **objetivos específicos** com este experimento de lei de Hooke:

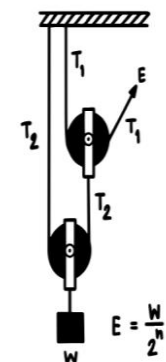
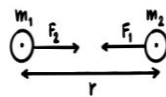
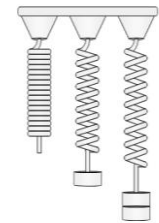


- reconhecer e aplicar os princípios das três leis de Newton em situações experimentais com blocos de madeira, caixa de papelão, elásticos e molas;
- investigar experimentalmente a relação entre força resultante, massa e aceleração;
- observar e interpretar o comportamento da força elástica em diferentes sistemas de associação de molas (em série e em paralelo);
- compreender como a constante elástica equivalente varia conforme o tipo de associação e relacioná-la com a aceleração de um sistema;
- analisar a direção e sentido da força de atrito entre superfícies sólidas nos diferentes contextos;
- verificar o qualitativamente o comportamento da força elástica em elásticos;
- estimular o raciocínio lógico e o trabalho colaborativo, por meio da manipulação experimental e da discussão dos resultados em grupo;
- valorizar a experimentação como recurso pedagógico no ensino de Física, aproximando os conceitos da realidade dos estudantes e promovendo uma aprendizagem duradoura.

Os **materiais necessários** para este momento serão:

1. Molas helicoidais cilíndricas de caderno
2. Arruelas
3. Balança de precisão
4. Gancho auxiliar maior
5. Fita métrica
6. Palito de madeira
7. Ganchos externos principais
8. Fita crepe
9. Torre sustentação feita de madeira com régua fixada

Para exemplificar melhor, na figura abaixo mostrarei os **materiais que utilizei**:



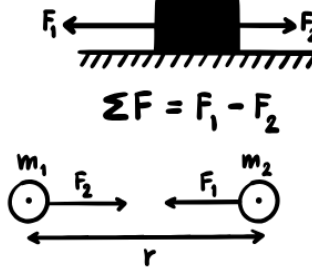
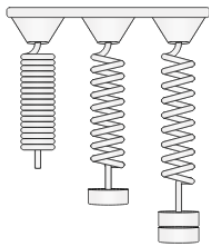
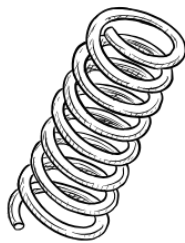
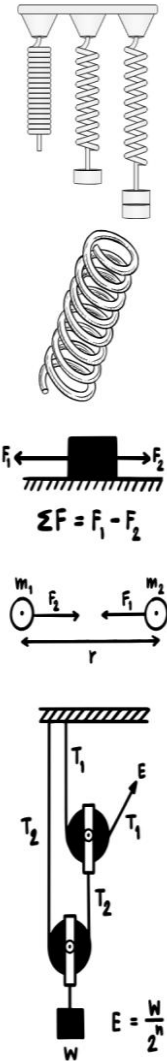


Figura 1 – Materiais necessários para o primeiro experimento.

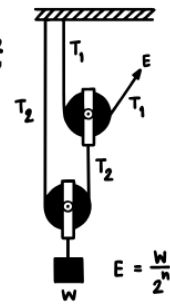
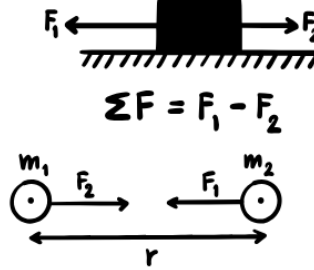
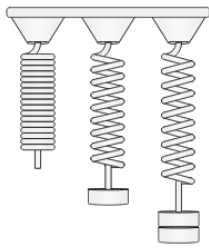
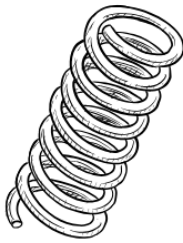


Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 1: como montar o experimento

Inicialmente, você pode deixar a torre de sustentação feita de madeira pronta sobre uma superfície horizontal. Após isso, fixe os ganchos externos principais na extremidade horizontal à esquerda ou à direita da torre (ou os dois em um só lado, como fiz). Eles servirão de apoio para as molas. Ainda na extremidade, você pode fixar ao lado uma fita métrica com o auxílio de uma fita crepe. Isso deixará os alunos com duas possibilidades para medir a deformação das molas.





Passo 2: medição da força elástica e da deformação das molas

Após calibrar a balança, peça para os alunos realizarem a medida da massa m , no Sistema Internacional de Unidades (S.I.), de todas as arruelas que serão utilizadas no experimento. Como eles já sabem que o peso dela é dado pelo produto de m pela gravidade local g , ficará fácil medir o módulo da força elástica F_{el} , em newtons, da mola em posições de equilíbrio estático, visto que:

$$F_{el} = \frac{mg}{1000}$$

Como no experimento feito por mim, 10 arruelas foram utilizadas. Desse modo, para 1, 2, 3, 4, ...10 arruelas, temos 10 valores de força elástica para associar aos 10 equilíbrios estabelecidos. Tendo isso em mente, peça para eles medirem o comprimento inicial x_0 da mola com o gancho na extremidade e anotarem esse valor. Colocando a primeira arruela, eles podem medir o valor da primeira deformação x_1 , colocando a segunda arruela, x_2 , e assim por diante (no meu caso, até o x_{10})

Para cada arruelas, a deformação Δx da mola pode ser calculada por:

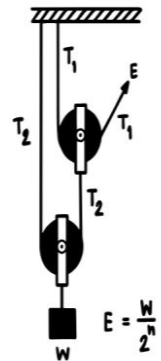
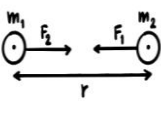
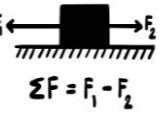
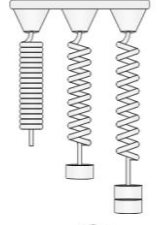
$$\Delta x_n = x_n - x_0$$

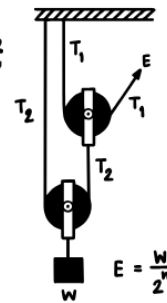
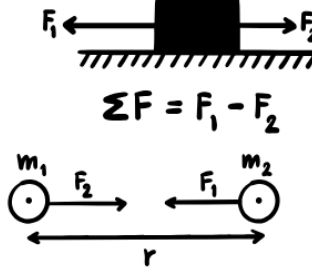
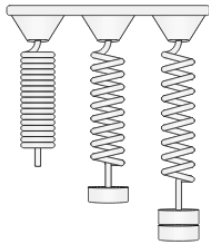
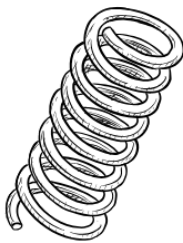
onde n é o número de arruelas colocadas no gancho.

Como a unidade de medida dos instrumentos utilizados está em centímetros, para calcular a deformação no Sistema Internacional de Unidades (S.I.), divida esses valores por 100. Desse modo:

$$\Delta x_n = \frac{x_n - x_0}{100}$$

Peça para eles fazerem o mesmo procedimento para as duas molas analisadas no experimento.





Passo 3: construção da tabela de força elástica vs deformação e análise gráfica

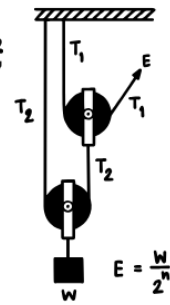
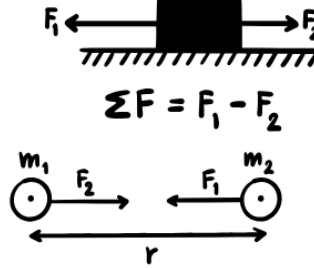
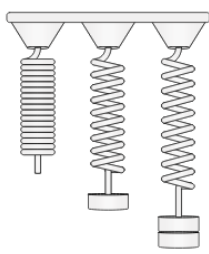
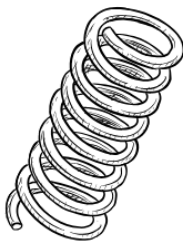
De posse dos dados anotados, é hora de construir uma tabela de força elástica por deformação e analisar o comportamento do par ordenado num gráfico. A Tabela 1 pode ser construída conforme o exemplo a seguir:

Tabela 1 – Comportamento da mola helicoidal com a quantidade de arruelas.

Arruelas (número)	Força elástica (newton)	Deformação (cm)
$n = 1$	$F_{el1} = \frac{mg}{1000}$	$\Delta x_1 = \frac{x_1 - x_0}{100}$
$n = 2$	$F_{el2} = \frac{2mg}{1000}$	$\Delta x_2 = \frac{x_2 - x_0}{100}$
$n = 3$	$F_{el3} = \frac{3mg}{1000}$	$\Delta x_3 = \frac{x_3 - x_0}{100}$
$n = 4$	$F_{el4} = \frac{4mg}{1000}$	$\Delta x_4 = \frac{x_4 - x_0}{100}$
$n = 5$	$F_{el5} = \frac{5mg}{1000}$	$\Delta x_5 = \frac{x_5 - x_0}{100}$
$n = 6$	$F_{el6} = \frac{6mg}{1000}$	$\Delta x_6 = \frac{x_6 - x_0}{100}$
$n = 7$	$F_{el7} = \frac{7mg}{1000}$	$\Delta x_7 = \frac{x_7 - x_0}{100}$
$n = 8$	$F_{el8} = \frac{8mg}{1000}$	$\Delta x_8 = \frac{x_8 - x_0}{100}$
$n = 9$	$F_{el9} = \frac{9mg}{1000}$	$\Delta x_9 = \frac{x_9 - x_0}{100}$
$n = 10$	$F_{el10} = \frac{10mg}{1000}$	$\Delta x_{10} = \frac{x_{10} - x_0}{100}$

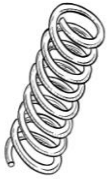
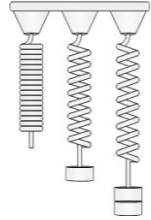
Fonte: Elaborado pelo autor.

Desse modo, os alunos irão notar que: $\Delta x_1 = x_1 - x_0$; $\Delta x_2 = 2 \cdot \Delta x_1$; $\Delta x_3 = 3 \cdot \Delta x_1$; $\Delta x_4 = 4 \cdot \Delta x_1$; $\Delta x_5 = 5 \cdot \Delta x_1$; $\Delta x_6 = 6 \cdot \Delta x_1$; $\Delta x_7 = 7 \cdot \Delta x_1$; $\Delta x_8 = 8 \cdot \Delta x_1$; $\Delta x_9 = 9 \cdot \Delta x_1$; e $\Delta x_{10} = 10 \cdot \Delta x_1$.



Diga aos estudantes que, para esse padrão acontecer, alguma coisa deve estar constante, visto que comportamento é linear. Ou seja: 1 arruela, Δx ; 2 arruelas, $2\Delta x$; 3 arruelas, $3\Delta x$, e por aí vai.

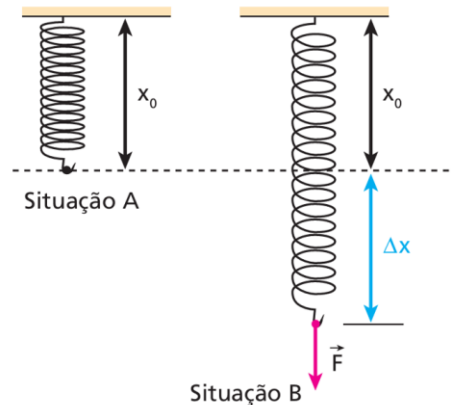
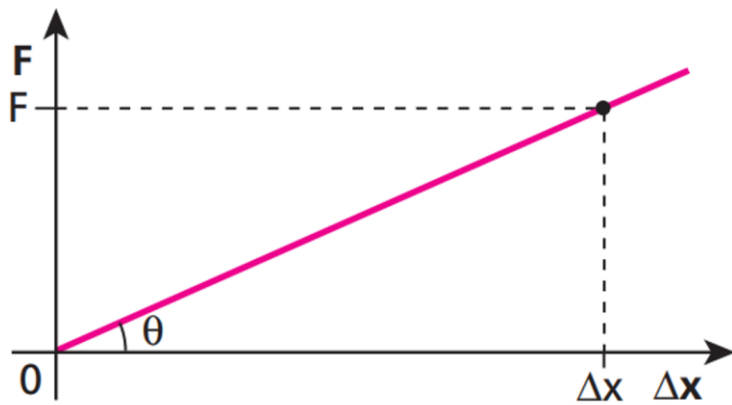
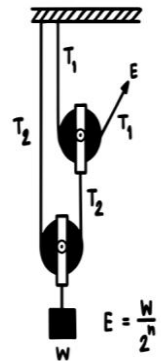
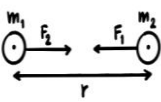
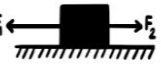
Atenção, professor! A massa das arruelas não pode ser excessivamente grande, tendo em vista a validade da lei de Hooke, pois a mola em questão pode se deformar e não voltar ao mesmo tamanho inicial. Desse modo, use arruelas da ordem de poucas gramas.



Passo 4: análise gráfica e cálculo da constante elástica da mola

Para o padrão citado anteriormente ocorrer, alguma coisa intrínseca à mola está por trás. Essa “coisa intrínseca” à mola na verdade é a constante elástica dela, que pode ser chamada de k . Uma análise dessa constante pode ser feita construindo um gráfico com o par ordenados de pontos no plano cartesiano, onde, no eixo y ficaria a força elástica e, no eixo x, a deformação sofrida pela mola. Com o auxílio de pincéis, peça para os alunos plotarem esse gráfico na lousa. Ele deverá ficar de acordo com a seguinte figura:

Figura 2 – Gráfico da força elástica em função da deformação de uma mola, fazendo um determinado ângulo com o eixo horizontal.

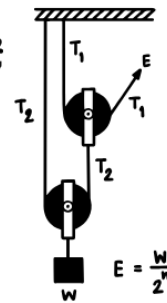
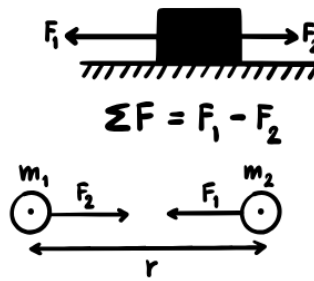
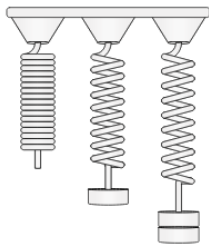
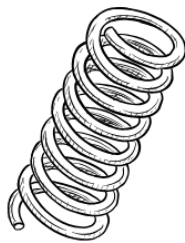


Fonte: Adaptado de Doca, Bôas e Biscuola (2012, p. 147, p. 155).

Olhando para o gráfico construído pelos alunos, peça para eles calcularem a tangente dessa reta com ângulo θ em relação ao eixo da deformação. Como o gráfico começa na origem do sistema ortogonal, será obtido a seguinte relação:

$$tg\theta = \frac{F_{el1}}{\Delta x_1} = \frac{F_{el2}}{\Delta x_2} = \frac{F_{el3}}{\Delta x_3} = \dots = \frac{F_{el10}}{\Delta x_{10}} = k$$





Portanto, nota-se que a força elástica, obedecendo a lei de Hooke, pode ser calculada de modo geral como:

$$k = \frac{F}{\Delta x}$$

onde sua unidade é o newton (N) dividido por metro (m), ou seja, N/m .

Passo 5: análise qualitativa da constante elástica e previsões para outras molas

Sugiro que faça uma interpretação física da constante elástica com os alunos e compare-a com outras molas, como de caminhões, de carros, de motos etc. Isso tornará a aprendizagem mais significativa e duradoura.

Após isso, fale para os alunos que, através dos dados obtidos, se pode prever o valor da constante elástica – em N/m , da seguinte maneira:

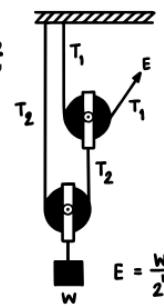
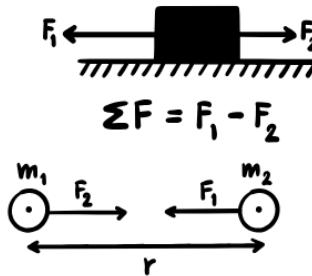
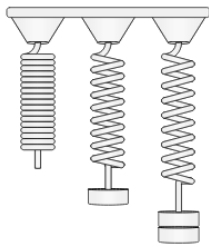
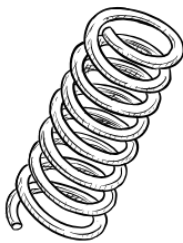
$$k = \frac{F_{eln}}{\Delta x_n} = \left(\frac{nm g}{1000}\right) \cdot \left(\frac{100}{x_n - x_0}\right) \Rightarrow$$

$$k = \frac{1}{10} \left(\frac{nm g}{x_n - x_0}\right)$$

Diga a eles que essa formulação geral é importante na área experimental da Física, pois ajuda na coleta dados de outras molas sujeitas ao mesmo regime de deformação. Usando essa linha de raciocínio, peça para os alunos calcularem a constante elástica da outra mola (de mesmo material e de igual comprimento inicial) usando a equação geral acima. Fazendo isso, eles se certificação que o valor é o mesmo ou aproximadamente igual.

Além disso, diga que as molas podem ter diferentes formatos nos quais a lei de Hooke não se aplica completo. Explique que essas molas são conhecidas como não lineares e podem ser no formato de barril, no formato cônico, ou até mesmo mais frágeis no formato que já conhecemos, de modo que, a partir de certa deformação, há uma variação na constante

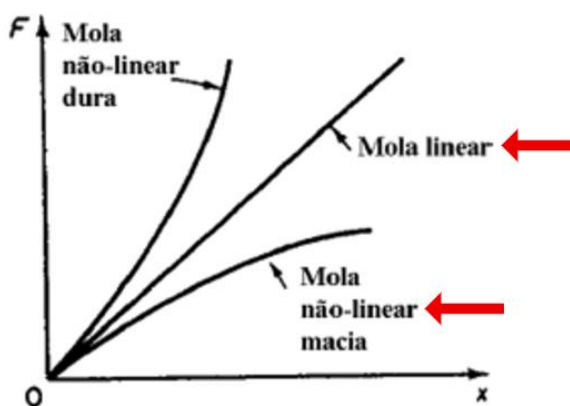




elástica. Diga também que molas, no geral, podem ser classificadas como lineares (nosso caso), não lineares macias e não lineares duras.

Mostre que o gráfico dessas três molas citadas pode ter o seguinte comportamento:

Figura 3 – Gráficos mostrando a possibilidade das molas não obedecerem a lei de Hooke e os que serão utilizados no experimento.



Fonte: Adaptado de Aranha *et al.* (2016, local. 2).

Os gráficos apontados podem ser feitos no experimento para pequenas e grandes deformações.

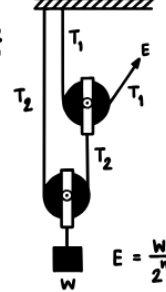
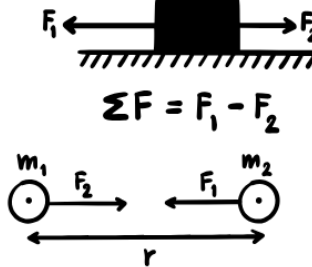
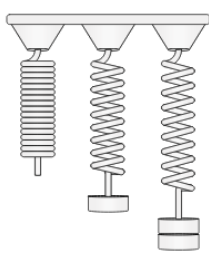
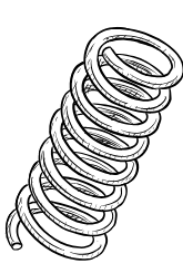
Passo 6: introdução à associação de molas

Após a constante da segunda mola ser calculada, induza os alunos a pensarem sobre as seguintes perguntas: o que aconteceria se colocássemos essas molas associadas em série ou em paralelo? Será que uma mesma força, análoga ao que fizemos no experimento anterior, ocasionaria uma mesma deformação no sistema ou vice-versa?

Feito isso, demonstre que na associação em série a constante elástica equivalente k_s fica mais “fraca”, de tal forma que, se elas fossem diferentes, então:

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n}$$

onde n é o número de molas.



Pergunte a eles: e se tivermos apenas duas molas? Espera-se que eles digam que haverá somente duas constantes no sistema, de modo que:

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

Afunile mais a pergunta: para o nosso caso, temos duas molas de constante iguais a k , como ficaria a nova expressão? Espera-se que eles desenvolvam o pensamento nisso e obtenham a seguinte expressão para o sistema:

$$k_s = \frac{k}{2}$$

Comprovando que a contante elástica deve ser a metade do valor encontrado no experimento feito.

Partindo disso, pergunte: e se tivermos as molas associadas em paralelo, a constante elástica equivalente k_s aumenta ou também diminui? Espera-se que eles respondam que acontece o inverso do sistema em série. Nesse viés, demonstre que:

$$k_s = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n$$

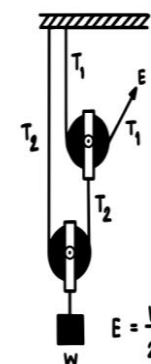
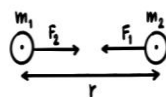
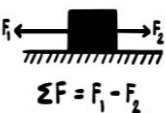
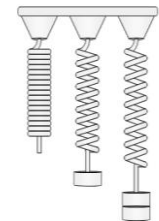
Para duas molas diferentes:

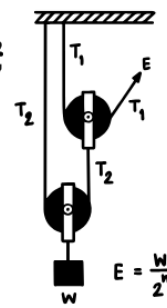
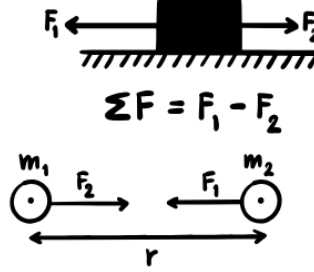
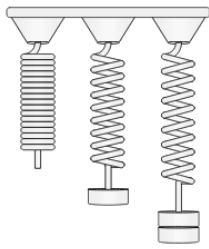
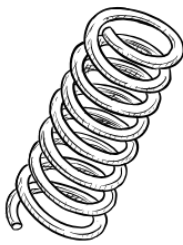
$$k_s = k_1 + k_2$$

Para duas molas iguais de constante k :

$$k_s = 2k$$

Comprovando que a contante elástica deve ser o dobro do valor encontrado no experimento feito.





Experimento 2: Associação de molas e as três leis de Newton

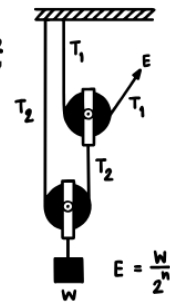
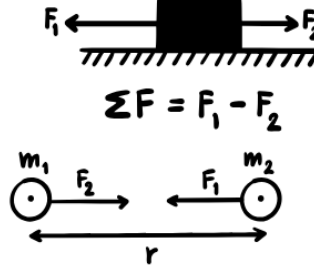
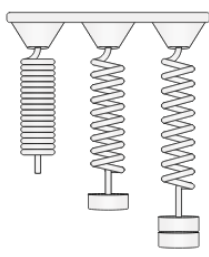
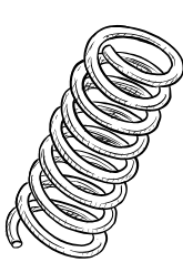
Professor, neste segundo experimento iremos utilizar os conceitos já estudados, como de força, de lei de Hooke e de associação de molas. Esses conhecimentos serão acoplados numa análise qualitativa das três leis de Newton, enfatizando também a força de atrito.

Aqui estão os **objetivos específicos** com este experimento de lei de Hooke:

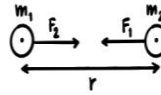
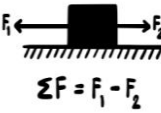
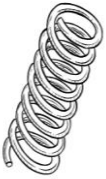
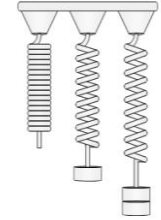
- reconhecer e aplicar os princípios das três leis de Newton em situações experimentais com blocos de madeira, caixa de papelão, elásticos e molas;
- investigar experimentalmente a relação entre força resultante, massa e aceleração;
- observar e interpretar o comportamento da força elástica em diferentes sistemas de associação de molas (em série e em paralelo);
- compreender como a constante elástica equivalente varia conforme o tipo de associação e relacioná-la com a aceleração de um sistema;
- analisar a direção e sentido da força de atrito entre superfícies sólidas nos diferentes contextos;
- verificar o qualitativamente o comportamento da força elástica em elásticos;
- estimular o raciocínio lógico e o trabalho colaborativo, por meio da manipulação experimental e da discussão dos resultados em grupo;
- valorizar a experimentação como recurso pedagógico no ensino de Física, aproximando os conceitos da realidade dos estudantes e promovendo uma aprendizagem duradoura.

Os **materiais necessários** para este momento são:

1. Carrinhos de madeira com rodinhas e ganchos internos
2. Ganchos principais internos
3. Bloco de madeira propriamente dito



4. Gancho auxiliar menor
5. Cola
6. Bloco de madeira com lixa
7. Carrinho de caixa de papelão com rodas garrafas PET fixadas com haste metálica
8. Cintas de nylon
9. Haste de madeira fracionada
10. Molas helicoidais cilíndricas de caderno
11. Elástico com gancho auxiliar
12. Anteparo de madeira



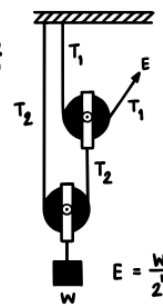
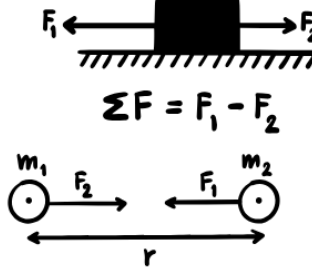
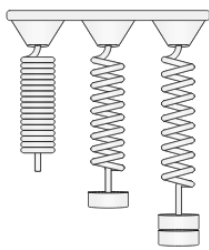
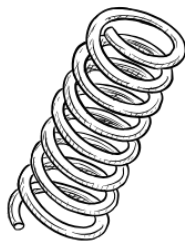
Professor, para exemplificar melhor, na Figura 4 mostrarei os materiais que utilizei neste segundo experimento:

Figura 4 – Materiais necessários para o segundo experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.





Passo 1: como montar o experimento

Caro docente, inicialmente tente achar materiais iguais ou análogos aos utilizados aqui. Optei por usar madeira por conta da facilidade de encontrá-la, assim como de furá-la com ferramentas adequadas. De posse dos materiais listados, coloque os ganchos principais internos dentro o orifício feito nos carrinhos, assim como no bloco com lixa. Para exemplificar isso, observe a Figura 5:

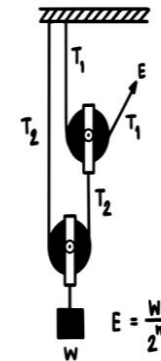
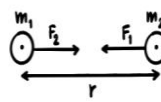
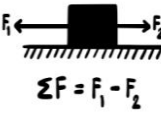
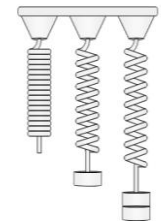


Figura 5 – Gancho principais colocados no orifício do carrinho para não atrapalhar as colisões.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Atenção, professor: para o bloco com lixa, o gancho principal interno é opcional, visto que essa aplicação é mais flexível para os alunos explorarem o comportamento da associação de molas, da força resultante, da aceleração e da força de atrito.

Na sequência coloque as cintas de nylon no anteparo e na haste de madeira fracionada junto ao carrinho de caixa de papelão com rodas de garrafas PET fixadas. A cola servirá tanto para fixar a lixa num bloco quanto para fixar uma superfície mais plana de papelão na parte superior do carrinho. Esta superfície facilitará a análise da inércia e da força de atrito nos blocos colocados sobre ele. No meu experimento, por exemplo, podemos vê-la em vermelho, como destacado na Figura 6:



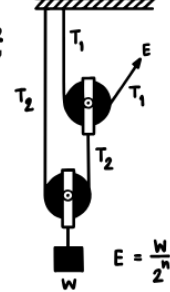
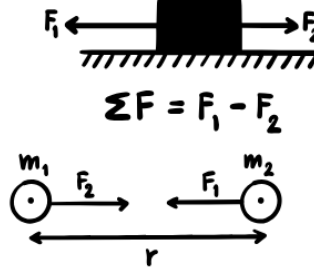
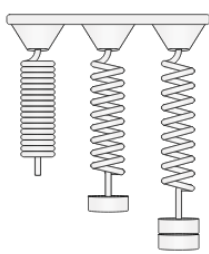
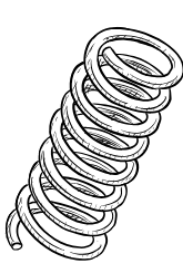


Figura 6 – Superfície plana de papelão na parte superior do carrinho.

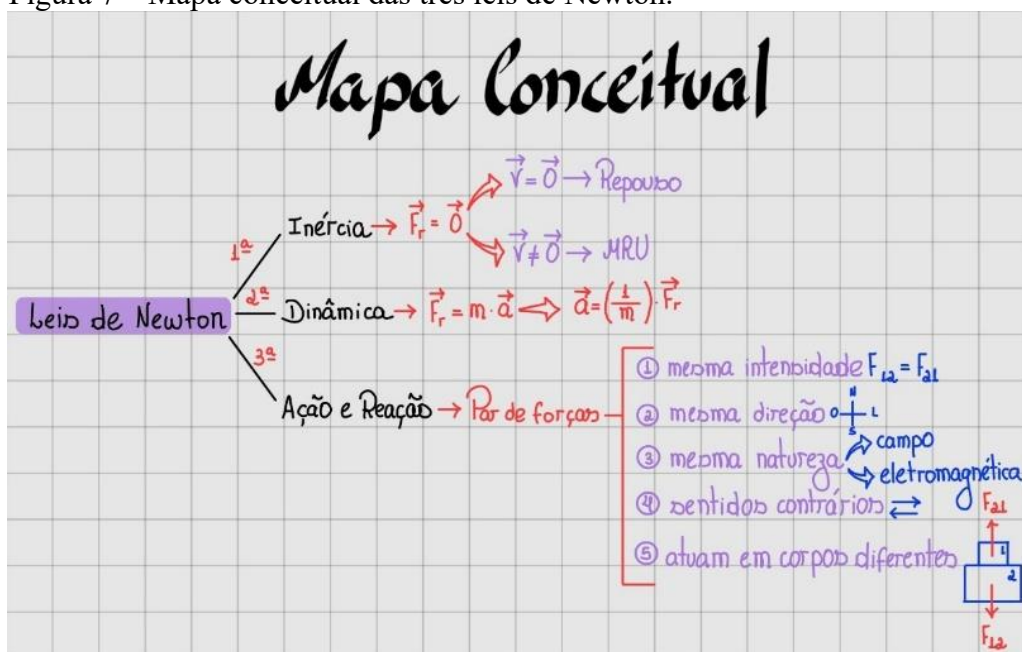


Fonte: Elaborado pelo autor.

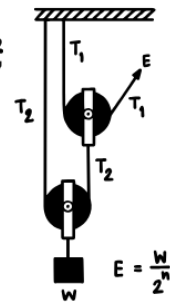
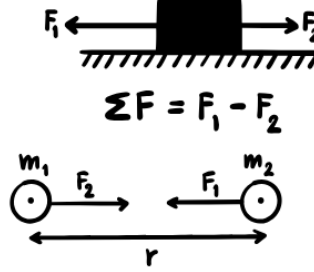
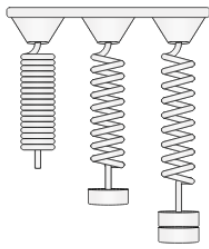
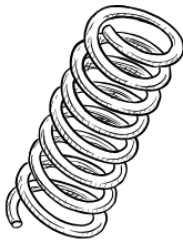
Passo 2: análise qualitativa das leis de Newton por meio do mapa conceitual

Nessa primeira parte, é interessante escrever na lousa as três leis de Newton de forma esquematizada. Sugiro fazer um mapa conceitual, de acordo com o seguinte Figura 7:

Figura 7 – Mapa conceitual das três leis de Newton.

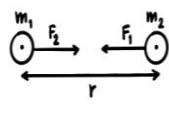
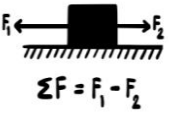
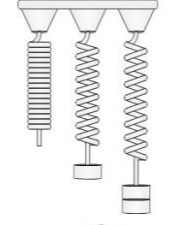


Fonte: Elaborado pelo autor.



Passo 3: análise do princípio fundamental da dinâmica

O primeiro experimento será para analisar o comportamento da força resultante com diferentes forças e diferentes massas. Com o anteparo e as molas, deixe os alunos escolherem a combinação que preferirem, desde que nesse sistema tenha, no mínimo, uma mola helicoidal de caderno (ou a elástico com gancho), o anteparo de madeira e um bloquinho (com ou sem rodinhas), seja ele de madeira ou de papelão. Vinculados ao anteparo de madeira e respeitando os limites da lei de Hooke, eles devem observar que, independentemente do bloco, a equação a seguir é válida:



$$\vec{F}_r = m\vec{a}$$

Variando as massas, analise a equação na forma:

$$\vec{a} = \left(\frac{1}{m}\right) \vec{F}_r$$

Ela facilitará a compreensão dos alunos na relação entre massa e aceleração de um sistema.

Passo 4: averiguar o comportamento de uma associação de molas na prática

Após introduzir as leis de Newton e mostrar aos alunos todos os materiais que serão utilizados, lembre o que foi visto na aula passada sobre associação de molas. Isso irá ajudar a relacionar o princípio fundamental da dinâmica e a associação de molas.

A Figura 8 mostra um exemplo de como foi feito a associação em série de molas na sala de aula:



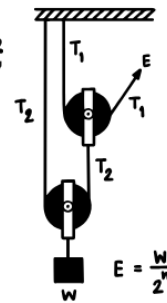
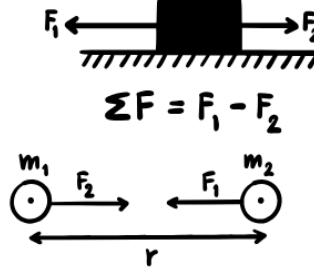
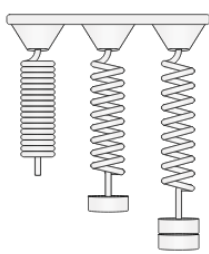
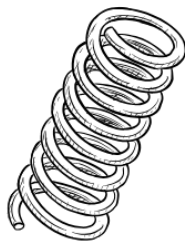
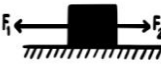
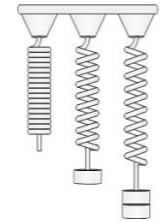
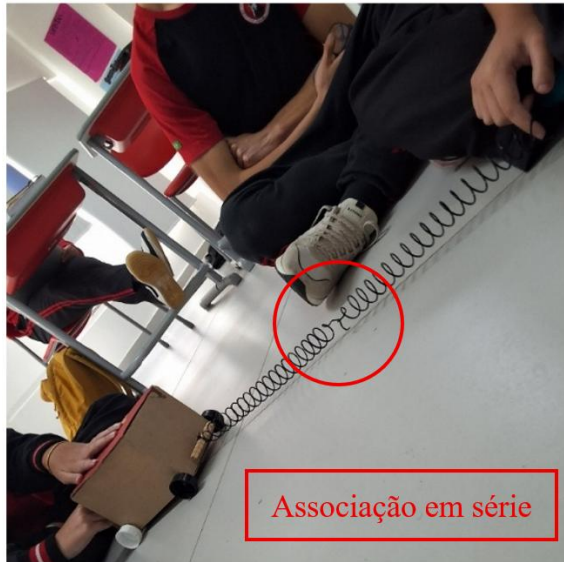
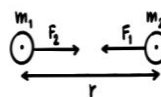


Figura 8 – Molas associadas em série para o estudo da constante elástica.



$\Sigma F = F_1 - F_2$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste caso, o módulo da aceleração resultante sobre o carrinho de papelão será:

$$a_{série} = \frac{F_r}{m_{pap}} \Rightarrow$$

$$a_{série} = \frac{1}{2} \left(\frac{kx}{m_{pap}} \right)$$

onde m_{pap} é a massa do carrinho de papelão.



Já a Figura 9 mostra como foi feita a associação em paralelo:



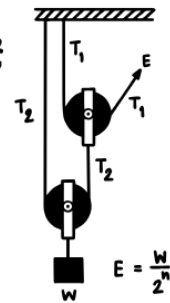
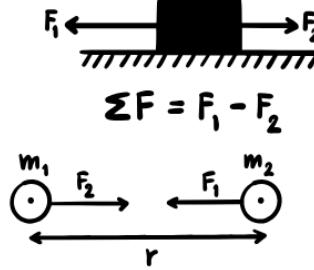
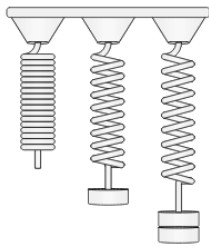
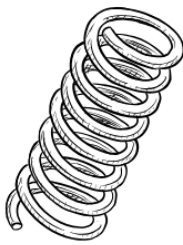


Figura 9 – Molas associadas em paralelo para o estudo da constante elástica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste caso, o módulo da aceleração resultante sobre o carrinho de papelão será:

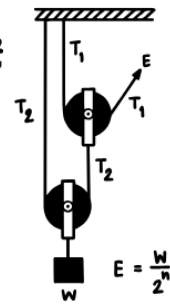
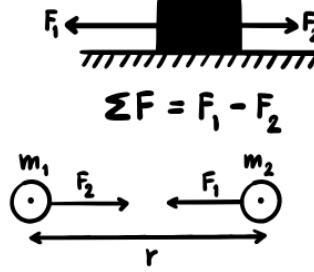
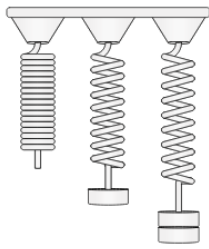
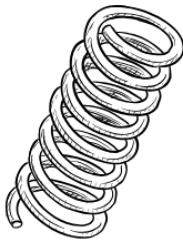
$$a_{paralelo} = \frac{F_r}{m_{pap}} \Rightarrow$$

$$a_{paralelo} = 2 \left(\frac{kx}{m_{pap}} \right)$$

Os alunos irão perceber que para a mesma deformação x , a taxa de variação de velocidade será muito maior. Você pode dizer que será o dobro da inicial.

Lembrando que você pode usar diferentes combinações com os recursos já listados. O importante é que fique claro para os alunos a diferença entre as associações.





Passo 5: análise do princípio da inércia

Utilizando os passos já feitos, peça para os alunos colocarem sobre a superfície vermelha do carrinho de papelão o seguinte bloco:

Figura 10 – bloco para trabalhar o princípio da inércia



Fonte: Elaborado pelo autor.

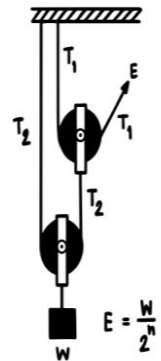
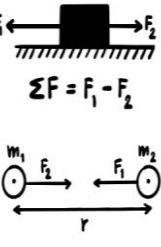
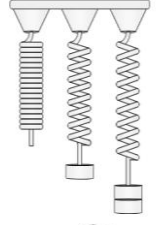
Feito isso, faça as seguintes perguntas para eles: (a) O que acontece com um bloquinho quando o carrinho de papelão colide com o anteparo de madeira? (b) O que acontece com o bloquinho quando o carrinho de papelão é puxado com uma força relativamente alta?

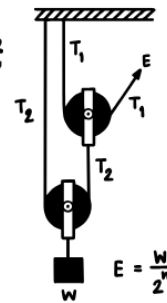
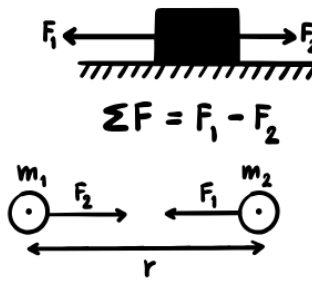
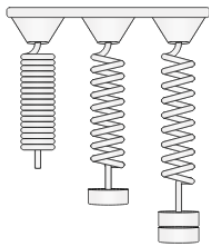
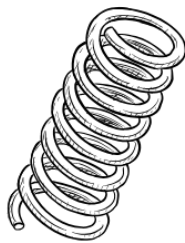
Nessa situação, eles podem criar uma grande deformação usando o elástico visto que isso ocasionará uma grande força sobre o carrinho de papelão e, conseqüentemente, irá gerar uma grande aceleração no sistema.

A ideia será analisar que o bloco tende a ficar em repouso ou em movimento retilíneo uniforme. Compare isso aos acidentes de trânsito e explique a importância do cinto de segurança para os passageiros em um veículo.

Passo 6: análise da força de atrito estático e cinético

Professor, inicie sua aula perguntando: a força de atrito é contrária ao movimento, a favor do movimento ou depende da situação?





Após isso, você pode falar para os alunos que a força de atrito estático é contrária a tendência de deslizamento entre duas superfícies sólidas. Em muitas situações do dia a dia, ela está na mesma direção e sentido do movimento. Já a força de atrito cinético é sempre contrária ao movimento de duas superfícies e ocorre quando há um deslizamento entre elas.

Para exemplificar, você pode usar o elástico, o anteparo, o carrinho de papelão e o bloco com lixa. Como o elástico utilizado nos exemplos se comporta como uma mola não-linear macia, você pode esticá-lo em várias elongações diferentes para analisar o comportamento do vetor força de atrito com os alunos. A Figura 11 mostra como foi feito isso em sala de aula na aplicação deste produto educacional.

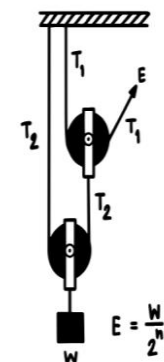
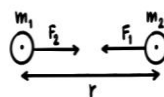
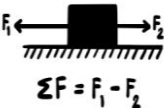
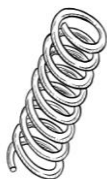
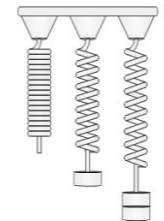


Figura 12 – Bloco com lixa sobre carrinho de papelão sendo puxado por um elástico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Passo 7: análise do princípio da ação e da reação

Docente, neste último passo você irá analisar com os alunos o princípio da ação e da reação. Nesse sentido, você pode pedir para os alunos fazerem diferentes combinações com os carrinhos, com as molas e com os blocos, como mostra a Figura 13 a seguir.



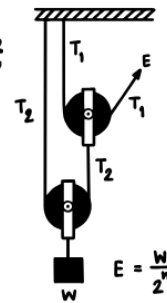
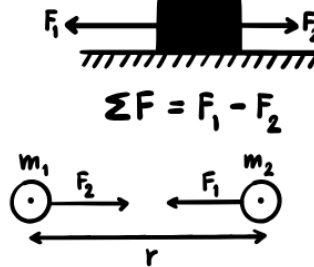
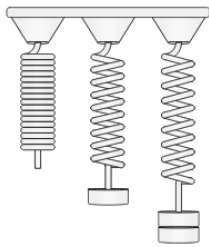
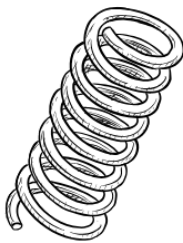
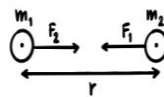
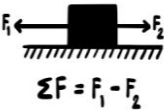
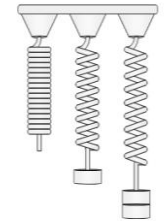


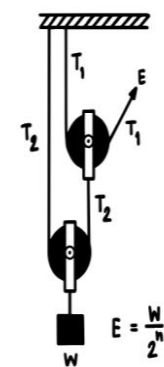
Figura 13 – Molas associadas em série para um análise do princípio da ação e da reação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pergunte a eles: em qual carrinho a mola deformada faz mais força? Provavelmente eles responderão que ela faz mais força no carrinho menor. Com isso, você pode pedir para os alunos medirem o deslocamento dos carrinhos num certo intervalo de tempo. Se eles forem iguais, os dois carrinhos, mesmo tendo densidades diferentes, têm aproximadamente a mesma massa.

Daí, caso queira se aprofundar mais na força que a mola faz em cada carrinho, pode demonstrar que, como eles tiveram o mesmo deslocamento, saíram do repouso e colidiram aproximadamente com a mesma velocidade final, então:



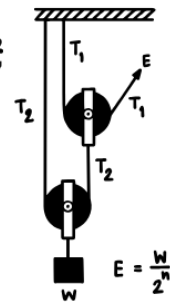
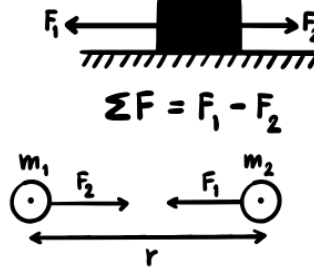
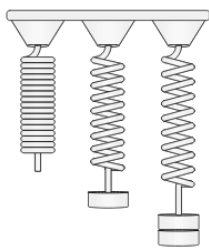
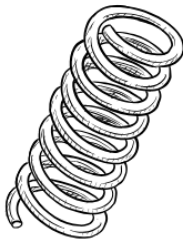
$$F_{\text{resultante}} = F_{\text{elástica}} = ma$$

$$a = \frac{v^2}{2\Delta S}$$

$$F_{\text{elástica}} = \frac{mv^2}{2\Delta S} \approx \text{constante}$$

Por que ela é aproximadamente constante? Porque estamos desprezando qualquer tipo de atrito existente na rotação das rodinhas.

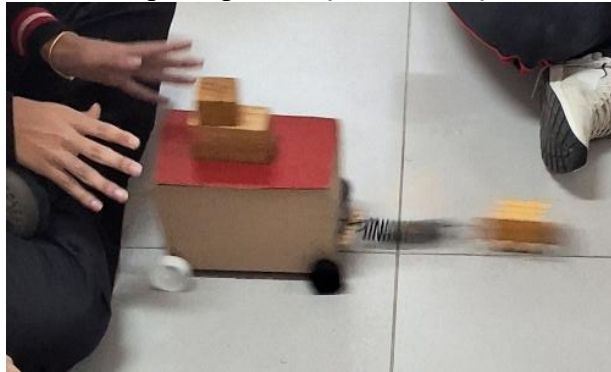
Explique a eles que esse isso se estende para corpos com diferentes massas como:



- a força de atrito dos seus pés com o chão da Terra;
- a força de atração gravitacional entre o Sol e os outros planetas;
- entre qualquer sistema com um par de forças de ação e de reação.

Na Figura 14, segue um exemplo disso:

Figura 14 – Sistema de blocos de madeira associados com o carrinho de papelão para a análise do princípio da ação e da reação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Boa sorte nas suas aulas, querido docente!

