

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física
Polo **ufscar** Sorocaba



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**GALILEU E O EXPERIMENTO DA TORRE DE PISA
NO ENSINO MÉDIO**

WELDER RIBEIRO DA SILVA ALVES

ORIENTADOR: PROF. DR. JOHNNY VILCARROMERO LÓPEZ

Sorocaba - SP
Fevereiro de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**GALILEU E O EXPERIMENTO DA TORRE DE PISA
NO ENSINO MÉDIO**

WELDER RIBEIRO DA SILVA ALVES

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Ensino de Física

Orientador: Prof. Dr. Johnny Vilcarromero López

Sorocaba - SP
Fevereiro de 2019

WELDER RIBEIRO DA SILVA ALVES

GALILEU E O EXPERIMENTO DA TORRE DE PISA NO ENSINO MÉDIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Física no Ensino Médio.

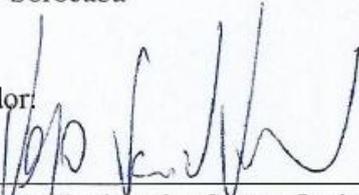
Sorocaba 27 de fevereiro de 2019.

Orientador:



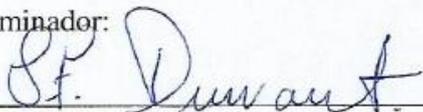
Prof. Dr. Johnny Vilcarromero Lopez
UFSCar – Sorocaba

Examinador:



Prof. Dr. João Batista dos Santos Junior
UFSCar – Sorocaba

Examinador:



Prof. Dr. Steven Frederick Durrant
UNESP – Sorocaba

Sorocaba
Fevereiro de 2019

Alves, Welder Ribeiro da Silva

Galileu e o Experimento da Torre de Pisa no Ensino Médio / Welder Ribeiro da Silva Alves. -- 2019.

185 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Johnny Vilcarromero López

Banca examinadora: João Batista dos Santos Junior; Steven Frederick Durrant

Bibliografia

1. Atividade Experimental. 2. História da Ciência. 3. Experimento da Torre de Pisa. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a todas as pessoas que lutam pelo ensino público.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Johnny Vilcarromero López por me orientar durante esses anos, sempre disposto a ensinar sobre Ensino de Física. Também sou muito grato pelos professores do *PROFIS-So* que me ajudaram a mostrar um bom caminho para enriquecer minhas aulas.

Meus agradecimentos às Profas. Dras. Adriana de Oliveira Delgado Silva e Fernanda Keila Marinho da Silva pela imensa contribuição aos temas relativos à teoria de aprendizagem e história da ciência.

Meus agradecimentos aos professores que participaram da banca de defesa do mestrado pelas correções e sugestões da minha dissertação.

Agradeço a minha família por ter me dado suporte para enfrentar as dificuldades desse trabalho, em especial minha esposa, Jussara Sanchez Secco.

Sou muito grato ao ensino público que utilizei em toda minha carreira estudantil, especialmente à UFSCAR *campus* Sorocaba.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) durante todo o período de formação.

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

“Galileo, Galileo,
Galileo, Galileo,
Galileo, figaro, magnifico”
(Freddie Mercury)

RESUMO

ALVES, Welder. Galileu e o experimento da Torre de Pisa no ensino médio. 2019. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2019.

É necessário que os estudantes saibam dos questionamentos científicos de cada época, a fim de que eles consigam entender como a ciência foi se desenvolvendo ao longo do tempo. Galileu viveu em um contexto histórico que possibilitou para que ele fosse reconhecido como um dos grandes personagens que mudaram a história da ciência em geral e da física em particular. A física de Galileu, assim como a física em geral, é uma construção humana, entretanto, sujeita às transformações da sociedade alicerçada no processo histórico. Para retratar essa condição com os estudantes, usamos os feitos de Galileu sobre a queda dos corpos presentes em alguns trechos de sua obra *Duas Novas Ciências* que pode ser relacionada com a lenda do experimento da Torre de Pisa. O intuito deste trabalho foi proporcionar aos estudantes o contato entre as teorias galileana e aristotélica acerca da queda dos corpos e entender por que Galileu pode ser chamado como o primeiro físico no sentido moderno. Além dos textos originais que usamos para refutar a lenda da Torre de Pisa, construímos um aparato experimental de baixo custo para medir a queda de móveis utilizando a plataforma Arduino juntamente com o sensor ultrassônico HC-SR04 na finalidade de medirmos a aceleração da gravidade. O produto educacional consiste em textos históricos sobre a lenda da Torre de Pisa e a construção e operação do aparato experimental com a placa Arduino, além de uma proposta didática com cinco atividades que podem ser trabalhadas com os estudantes do Ensino Médio. Os estudantes puderam levantar hipóteses para analisar os problemas envolvidos nestas atividades e analisaram alguns aspectos socioeconômicos e teóricos inerentes ao processo do desenvolvimento científico da época de Galileu. Como resultado final, podemos sugerir que existe um bom caminho para a prática pedagógica diária com nossos estudantes ao juntarmos teoria de aprendizagem, história da ciência e atividade práticas.

Palavras-chave: Ensino de Física, Atividade Experimental, História da Ciência, Experimento da Torre de Pisa, Arduino.

ABSTRACT

It is necessary students know the scientific questions of each time, so they may understand how science has developed over time. Galileo lived in a historical context that enabled him to be recognized as one of the great person who changed the history of science in general and physics in particular. Galileo's physics, like physics in general, is a human construct, so it is subject to transformations of society grounded in the historical process. To represent this condition with the students, we used Galileo's deeds about the fall of the bodies presented in *Two New Sciences*, which may be related to the legend of the Tower of Pisa experiment. The aims of this work were to provide students contact between Galilean and Aristotelian theories about the fall of bodies and to understand why Galileo may be called the first physicist in the modern sense. In addition to the original texts we used to refute the Tower of Pisa legend, we built a low-cost experimental apparatus for measuring falling bodies using the Arduino platform together with the HC-SR04 ultrasonic sensor to measure gravity acceleration. The educational product consisted of historical texts about the Tower of Pisa legend and the construction and operation of the experimental apparatus with Arduino board, plus a didactic proposal with five activities that it was worked with high school students. The students were able to raise hypotheses to analyze the problems involved in these activities and analyzed some socioeconomic and theoretical aspects inherent in the process of scientific development of Galileo's time. As a final result, we concluded that there is a good way for daily teaching practice with our students by bringing together learning theory, the history of science and practical activity.

Keywords: Physics Teaching, Experimental Activity, History of Science, Tower of Pisa Experiment, Arduino.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diferentes níveis de atividades experimentais de investigação.	22
Figura 3.1 - Placa Arduino UNO com especificações de entradas e saídas.	29
Figura 3.2 - Exemplo de programa do Arduino que faz o LED piscar a cada 1 s.	31
Figura 3.3 - LEDs acesos. LED laranja da placa e LED azul conectado ao pino 13 acendendo durante execução do programa da Figura 3.2.	31
Figura 3.4 - Representação do sensor ultrassônico HC-SR04 em funcionamento. “T” é inicial de transmissor e “R” de receptor.	32
Figura 3.5 - Representação dos pulsos ultrassônicos entre o sensor e o Arduino.	33
Figura 3.6 - Gráfico da velocidade do movimento uniformemente variado.	49
Figura 3.7 - Representação da queda de um móvel. À esquerda mostra a representação geométrica de um móvel em queda feita por Galileu. A vertical AB representa o tempo decorrido. Os segmentos na horizontal ao longo do segmento AB representa a velocidade adquirida até o instante correspondente no eixo dos tempos AB. O segmento vertical HI representa os espaços percorridos durante os tempos AB. De HI está representado à série ímpar dos espaços percorridos. A figura à direita deixa mais evidente essa relação da série ímpar.	52
Figura 3.8 - Lista de materiais com o preço médio especificado. Os produtos sem preço são de valor irrisório.	55
Figura 3.9 - Aparato experimental ultrassônico pronto para uso.	57
Figura 3.10 - Perfis do aparato ultrassônico.	58
Figura 3.11 - À esquerda, a superfície de trabalho está sendo detectada antes do alvo, então os dados serão imprecisos. Na parte à direita, a bancada não interfere no sinal, desse modo os dados estarão mais confiáveis.	59
Figura 3.12 - Representação da propagação da onda ultrassônica do sensor HC-SR04.	60
Figura 3.13 - Circuito eletrônico do aparato ultrassônico.	61
Figura 3.14 - Programa para medir distâncias e seus respectivos tempos de queda.	62
Figura 3.15 - Caixas de papelão utilizadas no experimento.	62
Figura 3.16 - Curva da queda do objeto em uma altura de um metro.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Medidas encontradas pelo sensor ultrassônico durante a queda do móvel.	63
Tabela 3.2 - Medidas de posições e intervalos de tempo do móvel registrado pelo sensor ultrassônico.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IDE – *Integrated Development Environment*

ENEM – *Exame Nacional do Ensino Médio*

MU – *Movimento Uniforme*

MUV – *Movimento Uniformemente Variado*

MNPEF – *Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física*

PROFIS-So – *Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba.*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA	19
2.1 ATIVIDADES PRÁTICAS NO ENSINO DE FÍSICA	19
2.2 HISTÓRIA DA CIÊNCIA PARA O ENSINO DE FÍSICA	23
2.3 JUSTIFICATIVA	26
CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	27
3.1 O ARDUINO	27
3.1.1 A Placa Arduino UNO.....	28
3.1.2 O Programa Arduino IDE.....	29
3.1.3 O Sensor Ultrassônico HC-SR04	32
3.2 GALILEU E A TORRE DE PISA	34
3.2.1 Galileu em seu Tempo.....	34
3.2.2 O Experimento da Torre Pisa	37
3.3 CONTEÚDO DE FÍSICA PRESENTE NAS <i>DUAS NOVAS CIÊNCIAS</i>	44
3.4 O APARATO EXPERIMENTAL DE QUEDA VERTICAL.....	53
3.5 REFERENCIAL TEÓRICO.....	66
CAPÍTULO 4 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E APLICAÇÃO DO PRODUTO	71
4.1 A ESCOLA E OS ALUNOS	71
4.2 SOBRE AS ATIVIDADES COM OS ESTUDANTES	72
4.3 SOBRE O LEVANTAMENTO DE IDEIAS PRÉVIAS	74
4.4 ATIVIDADE 1: O EXPERIMENTO MENTAL DAS DUAS PEDRAS CONJUGADAS	80
4.5 ATIVIDADE 2: DUAS BOLAS CAINDO DO ALTO DA TORRE	83
4.6 ATIVIDADE 3: COMO SE “MOVIMENTA” O MOVIMENTO	85
4.7 ATIVIDADE 4: UTILIZANDO O SENSOR ULTRASSÔNICO	92

4.8 ATIVIDADE 5: AFINAL, GALILEU FEZ OU NÃO FEZ O FAMOSO EXPERIMENTO DA TORRE DE PISA?	108
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	112
REFERÊNCIAS	114
APÊNDICE – PRODUTO EDUCACIONAL	118

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Pela nossa experiência em docência com o Ensino Médio, é comum que nossos estudantes ainda sejam mais “aristotélicos” do que “galileanos” acerca das concepções sobre o movimento. O termo “aristotélico” é muito usado pelos professores como simplesmente um jogo de palavras para significar que os alunos utilizam de “senso comum” para interpretar os fenômenos da cinemática. Na verdade, a teoria de Aristóteles está longe de ser “senso comum”, pois o ensino da física aristotélica era hegemônico nas universidades na época de Galileu (HESSEN, 1993). Para os estudantes perceberem a importância do estudo do movimento uniformemente acelerado, sobretudo a queda dos corpos, além deles conhecerem os questionamentos de Galileu a respeito da física aristotélica, é preciso entender que a física faz parte da sociedade, sujeita as transformações sociais de cada época.

Compartilhamos da ideia de que a física é uma construção humana, por isso, acreditamos que a contextualização histórica das descobertas científicas relacionada com os aparatos experimentais seja relevante aos estudantes para uma melhor compreensão dos conceitos e cálculos envolvidos, no nosso caso, do fenômeno da queda dos corpos envolvido no experimento lendário da Torre de Pisa.

Na rotina da sala de aula, nós, professores observamos muitas deficiências no processo de ensino-aprendizagem que muitas vezes não conseguimos resolvê-las devido à falta de formação adequada.

Realizar experimentos em sala de aula constitui uma importante ferramenta para o Ensino de Física, que pode ser usada de muitas maneiras. Desde atividades em que os estudantes são ensinados a fazer análises com instrumentos precisos de medição, até experimentos mais simples, dedicados a apresentar uma discussão conceitual entre os estudantes (AZEVEDO et al. 2009). O uso de experimentos pode ser entendido como uma ferramenta para levantar o interesse do estudante na exploração de um determinado conteúdo

de Ensino de Física. Explicá-la por meio de aparatos didáticos pode gerar a curiosidade dos estudantes, motivando-os a aprender os conteúdos trabalhados pelo professor durante a aula. Manter a curiosidade do estudante durante a maior parte da aula, não somente nos momentos iniciais, é essencial para o seu envolvimento no processo de aprendizagem (Laburú, 2006).

Pena et al. (2009) declararam que o uso da experimentação no ensino de Física possui alguns impedimentos como: pouca formação do professor ao se trabalhar com atividades experimentais e escassa pesquisa sobre a aprendizagem de alunos por meio de experimentos em física. No entanto, vimos notando que nesses últimos anos, as pesquisas sobre a utilização de atividades experimentais no ensino de física vêm crescendo, o que mostra uma preocupação em disponibilizar materiais significativos para melhorar a aprendizagem com uso de experimentação em física (MORAES e JUNIOR, 2014).

Galileu Galilei é muito citado nos livros didáticos, mas muito pouco dos seus pensamentos, ideias e experiências é devidamente conhecido e apreciado. Muitos dos conceitos físicos discutidos provavelmente são familiares aos professores, porém demos alguns caminhos na forma como devem ser ensinados.

Nosso trabalho pretendeu envolver a teoria de queda de corpos exposta por Galileu a partir de dois assuntos correlacionados: alguns elementos de história da ciência na lenda da Torre de Pisa e a atividade prática com Arduino para determinação da aceleração da gravidade.

No primeiro assunto, nossa intenção foi abordar os estudos de Galileu presentes em sua grande obra *Dois Novas Ciências*, vista por muitos historiadores da ciência como obra inaugural das ciências físicas, referentes à queda dos móveis. Galileu utilizava experimentos mentais para por em xeque a física aristotélica, como é o caso do experimento mental das duas pedras conjugadas. Galileu também usou outro recurso, original para a época, que foi a união da teoria com a técnica, visto que as universidades europeias do século XVII desprezavam a prática experimental e ensinavam somente a doutrina aristotélica dos movimentos dos corpos (HESSSEN, 1993).

Em toda abordagem escolar do estudo da física, Galileu é figura permanente na carreira escolar dos estudantes. Quem não estudou a queda dos corpos e a aceleração da gravidade sem ter ouvido falar dos estudos de Galileu sobre esses fenômenos físicos? Ou ainda, qual a relação de Galileu com o aperfeiçoamento das lunetas? No nosso trabalho, entendemos que a lenda da Torre de Pisa pode ser encarada como a mais famosa narrativa da História da Ciência. Entender a importância dessa lenda tanto no contexto histórico que vivia Galileu quanto no contexto em que vivemos é de grande importância para entendermos o que

significa ser a ciência física nos moldes modernos. Todavia, para o estudante e o público em geral, estes fatos históricos não apresentam vínculo com a matemática dos fenômenos físicos, aparecem mais como curiosidades. O aluno não entende bem o significado dos cálculos algébricos, ele apenas os executa. Neste sentido, a contextualização histórica das descobertas científicas é muito relevante para que o aluno compreenda os conceitos envolvidos no desenvolvimento matemático. A física não pode resumir-se ao cálculo e a resolução de problemas, é preciso que o estudante reflita sobre o fato abordado. A física é muito mais interessante do que é apresentada normalmente nas escolas. Além disso, já se produz, e muito, materiais para o ensino de Física Moderna para o Ensino Médio, mas muitos ainda não percebem o quanto os estudantes são “aristotélicos”.

Relacionar a atividade prática com a queda dos corpos é de fundamental importância para o estudo da aceleração da gravidade. Os estudantes precisam entender a proporção quadrática descoberta por Galileu para um móvel em queda: “que os espaços percorridos estão numa proporção dupla dos tempos, a saber, como os quadrados desses tempos” (GALILEI, 1988, p.174), pois essa proporção - espaço (S) dependente de (t^2) - basicamente, inaugurou a física no sentido moderno, quer dizer, a inserção da linguagem matemática nos fenômenos naturais posta à prova nos experimentos propostos por Galileu, proporcionou a eliminação de argumentos de autoridade e de especulação teórica, abrindo espaço para liberdade científica na investigação dos fenômenos naturais desde que alicerçada no método científico.

O experimento de queda vertical é tradicionalmente feito nas escolas, quando é feito, usando dois *photogates*, que são sensores que registram somente uma posição quando o corpo em queda obstrui a passagem do feixe de luz. Deste modo, esses sensores registram somente dois pontos da queda do corpo. Como a relação da distância com tempo do corpo em queda é caracterizado graficamente com uma parábola, os estudantes possuem dificuldade em relacionar somente dois pontos com uma função quadrática. Então nosso aparato experimental foi desenvolvido para medir não somente um ou dois pontos, mas vários pontos de posições e tempo de queda, sendo todos medidos eletronicamente com o ajuda de uma placa microcontroladora Arduino UNO e um sensor de movimento por ultrassom, o sensor HC-SR04.

Em relação ao uso do Arduino sabemos que essa tecnologia já é bem conhecida no Ensino de Física (CAVALCANTE et al., 2011; SOUZA et al., 2011; COLUCI et al., 2013; CAVALCANTE et al., 2014; GALERIU et al., 2014; CORDOVA e TORT, 2016). Há muitos trabalhos da integração das placas Arduino em projetos envolvendo experimentos

automatizados no Ensino de Física. Além da capacidade do Arduino em fazer diversas medições, essa plataforma eletrônica é relativamente barata e não necessariamente depende de objetos ou aparelhos caros.

O principal objetivo deste trabalho foi, junto aos estudantes do 2º e 3º anos do Ensino Médio, verificar experimentalmente a proporção quadrática de Galileu (S dependente t^2) medida pelo sensor ultrassônico e explicar a dependência das descobertas feitas por Galileu com o contexto socioeconômico da época em que ele vivia, sobretudo presente no lendário experimento da Torre de Pisa. Para atender a este objetivo disponibilizamos um produto educacional para o professor utilizar com seus estudantes.

Outro objetivo deste trabalho foi fornecer uma alternativa bem mais barata do que os produtos similares disponíveis no mercado e, ao mesmo tempo, expor os estudantes a uma postura mais investigativa quando confrontada a analisar um fenômeno físico com a ajuda do professor.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA

2.1 ATIVIDADES PRÁTICAS NO ENSINO DE FÍSICA

Se perguntarmos aos professores de ciências sobre qual a importância do uso de experimentos didáticos nas aulas, acreditamos que quase todos eles apoiarão o uso, quase todos acreditarão que o experimento é uma ótima ferramenta para o ensino de física. Mas se fizermos outra pergunta, mas desta vez, questionando se os professores fazem experimentos com seus estudantes, acreditamos que a maioria não exerce essa prática pedagógica, seja pela “falta de tempo” ou pela falta de um laboratório equipado com os devidos instrumentos para as atividades experimentais (LABURÚ, 2005).

Nesse trabalho, ao optarmos pelo uso de atividades experimentais didáticas no Ensino Médio, estamos cientes de que tanto no ensino público quanto no ensino privado, são consideráveis as dificuldades que os professores têm durante as aulas em aplicar uma atividade experimental com seus estudantes.

Um grande entrave no progresso das aulas práticas é a falta de formação do professor em melhor aplicar essas atividades práticas com seus alunos (GASPAR, 2005). O outro entrave é o preço caríssimo dos aparatos experimentais disponíveis no mercado, às vezes com pouca qualidade. Em nosso trabalho, levamos em consideração essas duas barreiras. Nosso aparato de queda livre é relativamente muito mais barato e com a qualidade igual ou superior dos aparatos experimentais disponíveis no mercado. Consideramos que a maior dificuldade

em realizar as atividades experimentais esteja mais concentrada nas dificuldades pedagógicas do que na falta de materiais para realizá-los.

Compartilhamos da visão de Gaspar (2014) em sua obra *Atividades experimentais no ensino de Física: uma visão baseada na teoria de Vigotski*, quando o autor enfatiza que os obstáculos de se aplicar atividades experimentais com os alunos residem mais em dificuldades pedagógicas do que na falta de bons materiais ou laboratórios para praticá-las.

Para entendermos a deficiência que os professores ainda têm sobre a prática pedagógica de utilizar as atividades prático-experimentais no ensino de física, inicialmente precisamos recorrer a uma breve história em que se iniciaram o uso das atividades experimentais no contexto escolar.

Com o pioneirismo da União Soviética em lançar o primeiro satélite artificial da Terra, o *Sputnik*, ficou evidente o atraso tecnológico que os Estados Unidos viviam em relação aos soviéticos durante a Guerra Fria referente ao lançamento de foguetes de longo alcance. Além de outras dificuldades para retornar a liderança perdida, os estadunidenses expuseram o ensino de ciências como prática ineficiente no atraso da corrida tecnológica. Precisou-se repensar o ensino de ciências norte-americano. Em meados da década de 1950, uma comissão de renomados físicos dos EUA, o PSSC (*Physical Science Study Committee*), ficou incumbido de lançar um novo plano de ensino de física para superar tecnologicamente a potência soviética:

Em 1957, depois de a União Soviética lançar com sucesso o *Sputnik*, disseminou-se nos Estados Unidos o medo de que as escolas americanas estivessem perigosamente atrasadas no ensino de ciências. Em resposta a essa percepção da ameaça soviética, o governo dos EUA aumentou os recursos da National Science Foundation em apoio aos objetivos do PSSC (GASPAR, 2014, p. 20).

A proposta curricular do PSSC foi utilizada nas escolas dos EUA e, mais tarde, em vários países, inclusive no Brasil. O PSSC não obteve bons resultados nem nos EUA e nem nos demais países, sendo abandonados por todos, inclusive pelo Brasil. Dois fatores foram fundamentais para o fracasso do PSSC (GASPAR, 2014).

O primeiro deles foi a ineficiente formação acadêmica daqueles que construíram as propostas. Apesar de serem especialistas em suas respectivas áreas, as propostas pedagógicas foram formuladas pelos próprios físicos que eram dedicados exclusivamente à pesquisa, não tendo contato com as escolas, nem formação pedagógica adequada. O segundo fracasso foi a surpreendente ingênua crença “na aprendizagem individual do aluno por meio de sua interação direta com o material produzido, a ideia de que os alunos poderiam redescobrir as

leis científicas por meio de atividades experimentais” (GASPAR, 2014, p. 30). Também fica clara essa ingenuidade no prefácio do próprio PSSC: “com aparelhamento simples de laboratório, os estudantes descobrem a lei do movimento de Newton” (GASPAR, 2014, p. 23).

Essa metodologia, também chamada de método por redescoberta, ainda permanece nas mentes de muitos professores de Física e de muitas outras pessoas formadas nas áreas científicas.

Gaspar (2014) descreve algumas críticas à pedagogia por redescoberta: “a crença de que as leis científicas possam ser ou ter sido descobertas a partir da observação é falsa; constitui um equívoco epistemológico” (GASPAR, 2014, p. 31). Para corroborar com essa afirmação, dentro tantos exemplos mencionados por Gaspar, vale destacar o exemplo da descoberta teórica do bóson de Higgs. Em 1964, os físicos belgas Robert Brout e François Englert e o físico inglês Peter Higgs anunciaram a descoberta de um meio onde as partículas elementares obtêm massa. Higgs propôs ainda a existência de uma partícula que tornaria esse mecanismo possível. Essa partícula ficou então conhecida como bóson de Higgs (GASPAR, 2014).

Entretanto, até o ano de 2008 não era possível detectar essa partícula, pois para gerá-la era necessária uma fonte que ainda não existia. Por esse motivo foi construído o LHC (*Large Hadron Collider*) que podemos traduzir por Grande “Colisor” de Hádrons. O custo estimado de construção do LHC foi cerca de quatro bilhões de euros na época de sua inauguração. Um investimento deste porte só foi feito sabendo exatamente o que se pretendia com ele. Seria inviável construir essa máquina apenas para observar as colisões e chegar a conclusões desconhecidas, como estamos acostumados no método científico tradicional (GASPAR, 2014). Assim, a existência do bóson de Higgs foi anunciada em 4 de julho de 2012 e o Prêmio Nobel de Física foi concedido a François Englert e Peter Higgs em 8 de outubro de 2013 (Robert Brout faleceu em 2011). A seguir, temos a justificativa da Fundação do Nobel para a conquista do prêmio do bóson de Higgs:

pela descoberta teórica de um mecanismo que contribui para o nosso entendimento da origem da massa das partículas subatômicas, e que recentemente foi confirmada por meio da descoberta da partícula fundamental prevista, nas experiências ATLAS e CMS do CERN no Large Hadron Collider (grifo nosso) (http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2013/press.html. Acesso em 15 de janeiro de 2019).

O método por redescoberta, que em muitos casos parte do uso tradicional do laboratório, possui concepções equivocadas epistemologicamente. Não se chega na “verdade” científica por observações cuidadosas, simplesmente aplicando o método científico tradicional, e ainda sem nenhuma concepção prévia. Ao observar um determinado fenômeno, os cientistas já têm em mente o que querem descobrir. O estudante ao usar um aparato experimental em aula para observar algum fenômeno científico, ele já tem que conhecer o fenômeno físico previamente. É a teoria que precede a observação e não o contrário. A teoria orienta a observação. É um grande erro achar que o aluno consegue descobrir uma lei científica apenas pela simples observação, se o aluno não conhece a lei, será impossível saber o que ele irá observar. Quer dizer, “é a compreensão teórica que dá propósito e forma aos experimentos” (HODSON, 1988, p. 55).

Existem outras abordagens às atividades práticas, que não prioriza usar o espaço do laboratório ou que privilegie um “empirismo abençoado”, dando aos alunos uma interpretação exagerada acerca da importância dos resultados experimentais, e uma visão grosseiramente enganadora a respeito da experimentação” (HODSON, 1988, p.55). Abordagens que podem ser feitas em sala de aula sem grandes dificuldades. Neste trabalho usamos a atividade experimental por investigação. Borges (2002) disponibilizou vários níveis de atividades experimentais utilizando como princípio a investigação. São eles:

Figura 2.1 - Diferentes níveis de atividades experimentais de investigação.

Nível de investigação	Problemas	Procedimentos	Conclusões
Grau 0	São dados	São dados	São dados
Grau 1	São dados	São dados	Em aberto
Grau 2	São dados	Em aberto	Em aberto
Grau 3	Em aberto	Em aberto	Em aberto

Fonte: (BORGES, 2002. p. 306).

Os níveis de investigação vão do grau zero ao grau três. O grau zero é o tipo de atividade em que o professor é inteiramente responsável pela preparação da atividade experimental de investigação. Já no grau três a responsabilidade da elaboração da atividade prática fica a cargo dos alunos.

Cabe ao professor decidir qual nível de investigação pode ser usado com seus alunos. Se os alunos não possuem prática em atividades experimentais nas aulas, dificilmente eles conseguirão fazer uma atividade de investigação de grau 3, por exemplo. A vantagem dessas abordagens de níveis de investigação é que com o hábito das práticas de laboratório didático, os alunos podem se sentir mais interessados, pois essas práticas possibilitam uma aproximação mais honesta do que significa o desenvolvimento científico, possibilitando aos estudantes e também aos professores uma inserção mais realista do processo de ensino-aprendizagem em ciências.

A escolha de atividades práticas de investigação é uma estratégia muito recompensadora, visto que os alunos aprendem muito mais sobre os conceitos e fenômenos a partir da investigação, pois eles têm maior oportunidade de manipular ideias (BORGES, 2002). Além disso, eles adquirem algumas das habilidades de raciocínio dos cientistas criativos. Também eles aprendem que a ciência é feita por pessoas que pensam, formulam palpites e tentam coisas que às vezes funcionam e às vezes falham. Por meio de tais experiências, podemos começar a desmitificar a ciência e torná-la acessível a todos (HODSON, 1988). Tudo isso, é claro, com a atuação do professor em todas as fases da atividade experimental.

O professor jamais tem figura secundária no processo da atividade de investigação, apesar do aluno possuir alguma autonomia nesses trabalhos práticos, ele nunca está sozinho em explorar tal fenômeno científico, cabe ao professor sempre auxiliá-lo na melhor interpretação do fenômeno envolvido.

As atividades práticas de investigação requerem mais tempo e dedicação para obter bons resultados de ensino-aprendizagem. Cabe ao professor e alunos realizarem mais estudo sobre as práticas envolvidas, pois os problemas não podem ter solução imediata, precisando de mais tempo e debates para solucioná-los. O professor tem que estar sensível a esses quesitos para assim obter um trabalho prático mais prazeroso e enriquecedor na sala de aula.

2.2 HISTÓRIA DA CIÊNCIA PARA O ENSINO DE FÍSICA

Na rotina da sala de aula ainda se evidencia que são pouquíssimas as vezes que se leva em consideração assuntos sobre a história da ciência aos estudantes no Ensino Médio. Disciplinas de filosofia e história da ciência não são encaradas com a determinada atenção na

formação educacional dos estudantes. São muitos os motivos para se relevar o estudo de história da ciência, desde pouca formação pelo professor ou mesmo por falta de tempo de trabalhá-la no currículo devido aos vestibulares. Sabemos que esses motivos tem sua relevância, porém esses fatores não podem justificar a negligência no tratamento dessa importante disciplina. A história da ciência deve complementar o ensino de ciências, deve propiciar uma formação cidadã aos nossos alunos, desta maneira a história das ciências é importantíssima para servir como complementação ao ensino de física.

Consideramos a ciência como uma prática social e cultural, a ciência não está em posição de neutralidade ou independência diante de sistemas sócio-históricos e econômicos ou algo atemporal surgido na “cabeça” do cientista sem qualquer influência da sociedade. A história da ciência pode elevar a formação dos alunos para cidadãos críticos, sensíveis às implicações sociais ao uso das ciências e das tecnologias. Na visão de Matthews (1995), a história das ciências, propicia a formação crítica das pessoas:

podem humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade; podem tomar as aulas de ciências mais desafiadoras e reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico; podem contribuir para um entendimento mais integral de matéria científica, isto é, podem contribuir para a superação do mar de falta de significação que se diz ter inundado as salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem a saber o que significam; podem melhorar a formação do professor auxiliando o desenvolvimento de uma epistemologia da ciência mais rica e mais autêntica, ou seja, de uma maior compreensão da estrutura das ciências bem como do espaço que ocupam no sistema intelectual das coisas (MATHEWS, 1995, p. 165).

Olhando pela perspectiva do senso comum e até mesmo pela comunidade científica, a ciência ainda é vista como um saber neutro que funciona de modo atemporal, portanto sem a influência de fatores externos que são fundamentais para a composição da sociedade, como fatores sócio-históricos e econômicos. A ciência é uma construção humana, então não está alheia aos fenômenos da sociedade. De acordo com o trabalho pioneiro de Thomas Kuhn presente na obra *A estrutura das revoluções científicas*, o autor contrapõe a visão comum demonstrando que a ciência se constrói tanto por fatores internos da própria ciência, quanto a acontecimentos externos. Desde então, procurou-se estudar a ciência, relacionando a prática do cientista com o contexto em que eles estão incluídos.

Além de associarmos a história da ciência como prática social e cultural, também é igualmente importante compreendermos a história da ciência como prática pedagógica do ensino de ciências. Então a história da ciência aplicada ao ensino de física tem que ser

inserida nesse contexto, o professor tem que relacionar o processo histórico com a aula a ser explorada. Pela leitura de Martins (2006), a conexão entre história da ciência e a prática pedagógica pode ajudar no aprendizado dos conteúdos científicos e pode oferecer vantagens em se trabalhar com as concepções prévias dos estudantes e destaca algumas:

conhecê-las e não fingir que não existem; não ridicularizá-las ou tentar recalculá-las mas tratá-las com respeito; entender seu papel, sua fundamentação para o indivíduo; compará-las com outras concepções – tanto a atualmente aceita pela ciência como outras alternativas; analisar as evidências a favor e contra cada uma delas; e tentar auxiliar o educando a passar por uma mudança conceitual, da antiga para a científica, através de argumentos da mesma natureza dos que são utilizados nas discussões científicas – mas não por um argumento de autoridade (MARTINS, 2006, p. xxi-xxii).

A importância da história da ciência no ensino de todos os níveis educacionais já é percebida por educadores de todo o mundo, inclusive pelo Brasil. Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) dos últimos anos para o Ensino Médio sugerem a história da ciência como complementação nas abordagens das aulas de ciências (MARTINS, 2006). No entanto, há ainda alguns empecilhos para que essa disciplina contribua efetivamente ao ensino. Continuando com Martins (2006), este enuncia de modo assertivo, três principais entraves da história da ciência no ensino.

Primeiro, a carência de professores com formação adequada em história das ciências, visto que há poucos cursos especializados disponível no país. Esta dificuldade é sentida no Brasil inteiro, porém aos poucos o país está evoluindo em aumentar os cursos de pós-graduação com ênfase em história das ciências.

Segundo é a falta de material didático adequado. Praticamente, não há muitos livros didáticos que abordam de maneira satisfatória a temática e são poucos os cursos de licenciatura em física que têm a disciplina de história das ciências como parte do currículo obrigatório.

Terceiro e último entrave ao ensino de história das ciências (e talvez seja o mais importante), são os equívocos a respeito da própria natureza da história da ciência e seu uso na educação. Possivelmente, esse problema seja o mais importante na nossa prática pedagógica, pois se optarmos em aplicar o ensino de história das ciências aos nossos alunos, sem nenhuma preparação e reduzirmos a história das ciências àquele tipo de história baseada na sequência de fatos cronológicos, anedotas, histórias falsas e argumentos de autoridade, ainda presentes em livros didáticos de nosso país, estaremos prestando um desserviço ao ensino de física (MARTINS, 2006).

Por fim, acreditamos que o ensino de história da ciência utilizada como complementação ao ensino de física, é uma ferramenta que ajuda a melhorar a relação que o aluno tem sobre a ciência. Ajuda na eliminação do “mito cientista” que aprendemos desde a mais tenra idade escolar de que os cientistas são praticamente semideuses, seres altamente geniais; na percepção de que a ciência não é um conjunto de verdades dogmáticas, obtidas pela observação desprovida do contexto social. Acreditamos que é tarefa da história da ciência possibilitar às pessoas o reconhecimento de que a ciência é uma atividade humana, desenvolvida por seres humanos influenciados em um contexto social.

2.3 JUSTIFICATIVA

Os aparatos experimentais para o ensino de física disponíveis no mercado são realmente muito caros, dificultando o acesso ao uso em escolas do ensino médio. Além do preço, esses equipamentos comerciais não oferecem a versatilidade se comparado com a plataforma Arduino. Essa plataforma foi inventada para que pessoas que não possuem conhecimento em programação e nem em eletrônica pudessem utilizá-la sem maiores empecilhos. O Arduino possui “código aberto” em sua estrutura de programação, o que facilita a construção do programa que o professor queira escrever, além de ter um fórum mundial para as mais diversas dúvidas sobre a sua utilização.

Mesmo com nosso aparato experimental de baixo custo ser acessível à aplicação nas escolas, não é o valor do equipamento que oferece a maior dificuldade em utilizar atividade experimental e história da ciência pelo professor em sala de aula. Acreditamos que o maior problema reside no equívoco em se acreditar na aprendizagem individual do aluno por meio de sua interação direta com o material produzido (GASPAR, 2014). Por essa perspectiva, no produto educacional está contida uma sequência de atividades destinada ao professor, o parceiro mais capaz, conduzir seu trabalho com seus alunos.

Capítulo 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Uma aranha executa operações semelhantes às do tecelão, e uma abelha envergonha muitos arquitetos com a estrutura de sua colmeia. Porém, o que desde o início distingue o pior arquiteto da melhor abelha é o fato de que o primeiro tem a colmeia em sua mente antes de construí-la com a cera. No final do processo de trabalho, chega-se a um resultado que já estava presente na representação do trabalhador no início do processo, portanto, um resultado que já existia idealmente (MARX, 2017, p. 255-256).

3.1 O ARDUINO

Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto que utiliza a linguagem de programação inspirada no C/C++ desenvolvida por Massimo Banzi e seus colaboradores, inicialmente destinado a educadores envolvidos com projetos de eletrônica e robótica, mas também para amadores que procuram “hardware” acessível e “software” relativamente fácil de usar. A placa Arduino utiliza um único microprocessador funcionando em 16 MHz com um núcleo de 8 bits e tem uma quantidade limitada de memória disponível, com 32 kB de memória *flash* (onde 0,5 kB usado pelo *bootloader*) e 2 kB de SRAM (BANZI, 2009).

O Arduino é composto de duas partes principais: a placa Arduino, que é a placa eletrônica (o hardware) onde insere os programas e o conecta aos dispositivos eletrônicos; e o Arduino IDE (*Integrated Development Environment*), o programa (*software*) para trabalhar no computador. O IDE é usado para criar um programa que pode ser enviado à placa Arduino.

3.1.1 A Placa Arduino UNO

A placa Arduino é uma pequena placa microcontroladora. Este microcontrolador é um circuito integrado que basicamente é o “cérebro” da placa, contém as funções principais de um computador tradicional só que em um pequeno “chip” de 28 pinos. A placa do Arduino é composta principalmente por um microcontrolador ATMEL/ATmega 328, um dispositivo de 8 bits da família AVR. Ele conta com 32 kB de memória flash (mas 512 Bytes são utilizados pelo *bootloader*), 2 kB de memória SRAM e 1 kB de memória EEPROM. Pode operar a até 20 MHz, porém na placa Arduino UNO opera em 16 MHz, valor do cristal externo que está conectado aos pinos do microcontrolador.

Na placa Arduino há todos os componentes necessários para que este microcontrolador funcione corretamente e se comunique com o computador. Existem muitas versões do Arduino, a versão usada neste trabalho é o Arduino UNO, que é o mais simples de usar e tem o preço mais acessível. O Arduino UNO, figura 3.1, contém essas especificações: 14 portas digitais, que são pinos digitais “IO” (*input e output*) de pinos 0 a 13, que podem ser entradas ou saídas, especificadas pelo programa criado no IDE; e 6 portas analógicas, que são pinos de entrada analógica (pinos 0 a 5).

A placa pode ser alimentada a partir da porta USB do computador, da maioria dos carregadores USB ou de uma fonte de alimentação externa de 9 V recomendada pelo fabricante.

Figura 3.1 - Placa Arduino UNO com especificações de entradas e saídas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Não foi preciso usar uma placa Arduino que faz cálculos mais rápidos e conseqüentemente custar mais cara. A facilidade da placa Arduino UNO é que o seu menor custo poderia atrair o uso de um número maior de escolas.

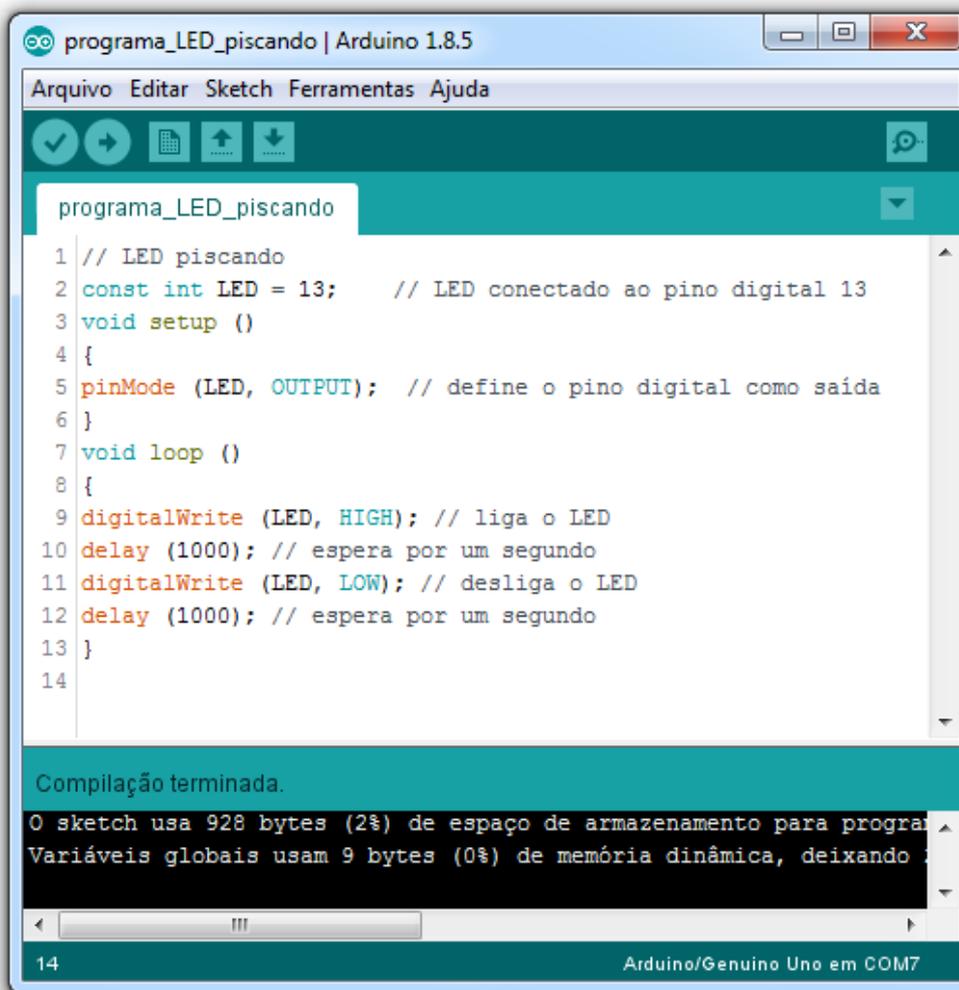
3.1.2 O Programa Arduino IDE

O Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) é um ambiente de programação que permite ao usuário esboçar diferentes tipos de programas e carregá-los no microcontrolador Arduino. O Arduino usa uma linguagem de programação acessível, baseada na linguagem de programação chamada *Processing*. Depois que o usuário escreve seu código, o IDE compila e carrega o programa para o microcontrolador Arduino. O Arduino IDE possui um analisador de código interno que verifica o código do usuário antes de enviá-lo ao Arduino. O *software* IDE inclui o conjunto de diferentes tipos de programas que estão prontos para serem testados no dispositivo. Depois de testar o programa, ele pode ser enviado para o Arduino por cabo USB (BANZI, 2011). A figura 3.2 mostra uma captura de tela do Arduino IDE.

O Arduino IDE foi desenvolvido, principalmente, para as pessoas com conhecimentos limitados de programação. O código IDE do Arduino é chamado de "sketch". O editor do código possui recursos que usamos no dia a dia, como realce de sintaxe, recuo automático, etc. Um clique do mouse é suficiente para compilar e carregar programas em uma placa do Arduino. Os códigos IDE do Arduino são escritos na linguagem de programação C/C++. Basicamente, todo programa que é executado em um "loop infinito" é construído por duas

funções: `setup ()` e `loop ()`. O “**setup ()**” é chamado no início do programa para inicializar as configurações, como portas e periféricos de entradas e saídas. O “**loop ()**” é uma função que gera um “loop” com o conteúdo declarado. O conteúdo da função “loop” é repetidamente executado em um “loop” infinito.

Na figura 3.2 está exposto um exemplo de programação básica para familiarizarmos com o Arduino. É um programa simples que faz um LED piscar em um intervalo de 1 segundo consecutivamente. As placas Arduino são instaladas com um LED e um resistor no pino 13. O programa abaixo na figura 3.2 indica um LED piscando. Quando executado o programa, liga o LED conectado ao pino 13 por um segundo e o desativa por um segundo repetidamente pela função “**loop()**”. A figura 3.3 mostra os LEDs da placa acesos, tanto o LED da própria placa, quanto o LED conectado no pino 13. Vale lembrar que para não danificar o LED externo, é importante colocar um resistor em série com ele. O programa transforma o pino 13 em uma saída (apenas uma vez no início) pela função `setup()`; entra em um loop; liga o LED conectado ao pino 13 (figura 3.3); espera por um segundo; desliga o LED conectado ao pino 13; e espera por um segundo e volta para o início do “loop”.

Figura 3.2 - Exemplo de programa do Arduino que faz o LED piscar a cada 1 s.

```
programa_LED_piscando | Arduino 1.8.5
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda
programa_LED_piscando
1 // LED piscando
2 const int LED = 13; // LED conectado ao pino digital 13
3 void setup ()
4 {
5 pinMode (LED, OUTPUT); // define o pino digital como saída
6 }
7 void loop ()
8 {
9 digitalWrite (LED, HIGH); // liga o LED
10 delay (1000); // espera por um segundo
11 digitalWrite (LED, LOW); // desliga o LED
12 delay (1000); // espera por um segundo
13 }
14
Compilação terminada.
O sketch usa 928 bytes (2%) de espaço de armazenamento para programar
Variáveis globais usam 9 bytes (0%) de memória dinâmica, deixando
14 Arduino/Genuino Uno em COM7
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.3 - LEDs acesos. LED laranja da placa e LED azul conectado ao pino 13 acendendo durante execução do programa da Figura 3.2.

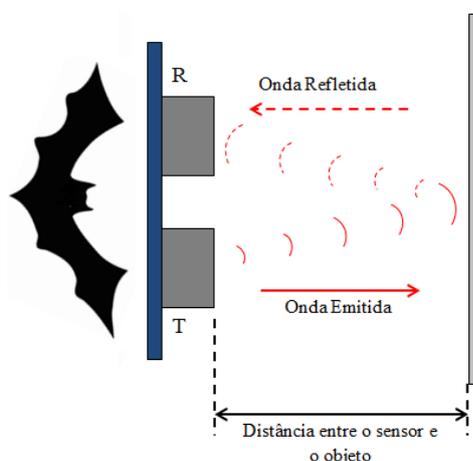
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 O Sensor Ultrassônico HC-SR04

Além da placa Arduino, são fornecidos vários sensores e atuadores que podem ser conectados nele. São componentes eletrônicos periféricos que interagem com o Arduino.

O sensor ultrassônico é feito com material piezoelétrico que emite ondas ultrassônicas no espaço aberto onde quer que seja montado e depois recebe as ondas refletidas. Utilizamos o sensor de movimento ultrassônico com os alunos. Mais especificamente usamos o sensor ultrassônico chamado HC-SR04 que emite ondas ultrassônicas em 40 kHz para determinar a distância de um objeto a partir do tempo de voo do som. É um sensor de distância sem contato com módulos separados de transmissão e recepção da onda ultrassônica. A onda ultrassônica é gerada por um material piezolétrico que atua como transdutor. Fornecido ao material uma tensão, ele vibra emitindo a onda de ultrassom (no transmissor). Do outro lado, o transdutor como o receptor irá converter ondas ultrassônicas refletidas em grandeza elétrica. O processo de funcionamento do sensor ultrassônico é semelhante ao fenômeno de ecolocalização usado pelos morcegos para detectar o local dos objetos ou a da presa. Isso é usado por vários animais que atuam como sensores ultrassônicos emitindo as chamadas e, em seguida, recebem os ecos de suas chamadas que se recuperam de vários objetos (figura 3.4). Esses ecos os ajudam a encontrar e identificar os objetos próximos a eles. Os morcegos têm o potencial de produzir sons que estão além das habilidades auditivas dos ouvidos humanos, portanto eles enviam esses sons e ouvem os ecos ressaltados produzindo informações visuais e sonoras quando ouvem os ecos para identificar os objetos.

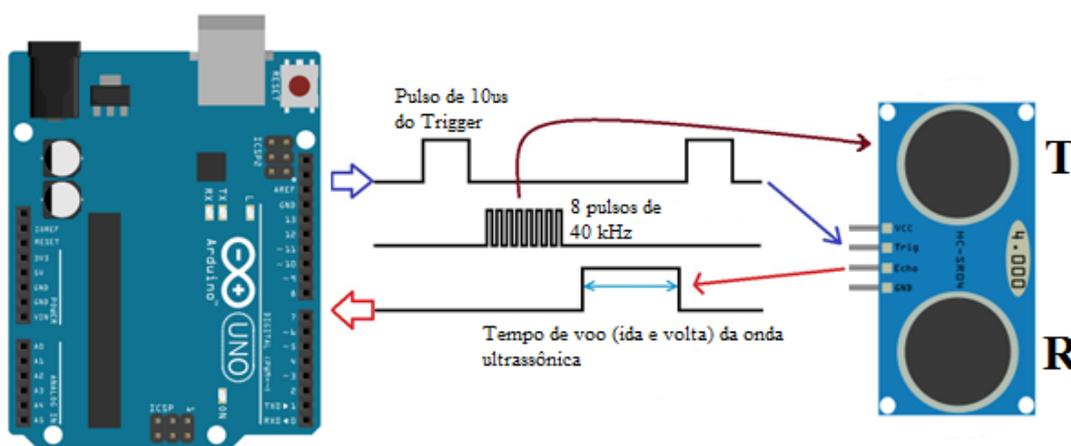
Figura 3.4 - Representação do sensor ultrassônico HC-SR04 em funcionamento. “T” é inicial de transmissor e “R” de receptor



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sensor ultrassônico HC-SR04 é usado para medição de distâncias de 2 cm até 4 m, com incerteza de +- 0,3 cm, com medidas efetivas de distâncias em um ângulo de até 15°. Não foi testado se o sensor mede distâncias de até 4 m, o máximo que medimos foi de 2 m de altura, o que está razoável para nossos anseios. O sensor ultrassônico HC-SR04, possui quatro pinos: dois pinos de tensão de alimentação, Vcc (tensão de 5V) e GND (0V); e dois pinos de sinais, um pino de entrada (*trig*) e outro pino de saída (*echo*). Este sensor inicia seu funcionamento com um pulso de disparo (*trigger*) de 10 microssegundos para produzir 8 pulsos de ondas ultrassônicas a 40 kHz pelo transmissor (figura 3.5). Nesse intervalo, o sensor mede o tempo até detectar a onda refletida pelo receptor (*echo*).

Figura 3.5 - Representação dos pulsos ultrassônicos entre o sensor e o Arduino.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distância calculada é proporcional à duração desse pulso. Para calcular a distância, vale ressaltar que a onda ultrassônica percorre duas vezes a mesma distância, então na eq. (3.1) segue o cálculo para obter a distância:

$$d = \frac{v_{\text{som}} \cdot \Delta t}{2}, \quad (3.1)$$

Para obter melhores resultados, os sensores ultrassônicos deverão ser orientados de maneira que as ondas sonoras atinjam os objetos tão perto quanto possível da linha perpendicular entre o sensor e objeto. Outro fator de operação do sensor diz respeito à **zona morta**, que é a região que determina a menor distância de detecção. Nenhum objeto deve ser colocado na zona morta, porque isso pode levar a medições incorretas, a zona morta do sensor

HC-SR04 é até 2 cm do sensor até o objeto, quer dizer, este sensor começa a efetuar boas medidas a partir de 2 cm.

3.2 GALILEU E A TORRE DE PISA

3.2.1 Galileu em seu Tempo

Galileu Galilei certamente representa uma figura de tremenda estatura na fundação da física clássica e no desenvolvimento do método experimental da ciência. Em qualquer leitura que se queira ter uma noção estrutural da história da ciência, essa leitura sempre será confrontada por uma ou mais façanhas atribuídas a Galileu. Este aperfeiçoou a luneta, fazendo grandiosas descobertas celestes, fundando a astronomia moderna; desenvolveu a teoria dos movimentos, elucidando o movimento de queda livre e movimento acelerado; estudou a resistência dos materiais o que atualmente é a engenharia civil. Não é exagero mencionar que é dado o crédito a Galileu o reconhecimento de fundador da física no sentido moderno.

Apesar dos grandes feitos de Galileu, isso não quer dizer que os trabalhos desenvolvidos por ele dependeram somente de sua genialidade como físico-geômetra sem qualquer influência de fatores externos na construção da ciência galileana.

No início do século XX, historiadores da ciência começaram a criticar a visão positivista da ciência, que se baseava em acreditar que a metodologia científica era independente em relação aos acontecimentos externos. Kuhn (2003) fez uma leitura de que a inquietação dos historiadores da ciência residia no fato de que ao localizar o momento do desenvolvimento de determinada lei ou teoria científica, não caberia separá-la dos conhecimentos extracientíficos ou de teorias declaradas futuramente como “erradas”, isto é, não aceitas. Não havia como distingui-las do ponto de vista do passado, pois ambas resultavam dos mesmos métodos e se estabeleciam pelas mesmas razões.

Para responder esses questionamentos, os historiadores da ciência incluíram as forças externas para explicar a aceitação de algumas teorias em detrimento de outras. Para citar um exemplo, Boris Hessen, em uma palestra realizada em 1931, no II Congresso Internacional de História das Ciências e das Tecnologias em Londres, afirmou que o desenvolvimento científico do *Principia* de Newton foi impulsionado pela necessidade da burguesia mercantil

como força econômica emergente em substituição ao feudalismo. A burguesia necessitava de infraestrutura para seu desenvolvimento mercantil, por isso tecnologias em transporte marítimo, indústria da mineração e indústria da guerra eram privilegiadas aos olhos dessa nova classe dominante (HESSEN, 1993). A burguesia mercantil, para crescer e esse tornar hegemônica, precisava resolver problemas técnicos essencialmente mecânicos que o impediam de crescer e se fortalecer como classe dominante:

A construção de canais, eclusas e navios; a construção de poços e de minas, sua ventilação, o bombeamento de água; o projeto de construção de armas de fogo e de fortificações; os problemas de balística; a produção e projeto de instrumentos para a navegação; a descoberta de métodos para o estabelecimento de rotas marítimas – tudo isso exigia um tipo de homem totalmente diferente daquele que até então estava sendo preparado pelas universidades (HESSEN, 1993, p. 46).

Influenciado por Marx, Hessen (1993) destacou a questão econômica, sobretudo as forças produtivas, como motivadoras do desenvolvimento científico e tecnológico. Para deixar evidente que os fatores externos influenciaram na produção intelectual, Hessen (1993) apoiou-se na obra *A Ideologia Alemã* (cf. Marx e Engels, 2001, p. 48) como fio condutor para entender a relação das classes dominantes com as ideias dominantes da sociedade, inclusive as ideias dominantes na ciência:

As ideias da classe dominante em cada período histórico são as ideias dominantes, e a classe dominante distingue suas ideias de todas as suas ideias anteriores, apresentando-as como verdades eternas. Esta classe deseja reinar eternamente e a (suposta) eternidade de suas ideias serve para fundamentar a inviolabilidade de sua dominação (HESSEN, 1993, p. 32).

Nesse contexto, o sucesso de Galileu Galilei em desenvolver sua ciência mecanicista residia no fato que o capital mercantil necessitava de sistemas mecânicos para desenvolver sua força produtiva. A burguesia necessitava de ciência e tecnologia necessariamente mecânicas. Galileu era professor de matemática, estudioso de balística e resistências dos materiais; residiu perto do imponente Arsenal de Veneza; e questionador das ideias de Aristóteles, filósofo que teve suas ideias científicas dogmatizadas pela Igreja, sendo esta defensora das ideias da economia feudal. Galileu, então, tinha todos os atributos necessários para despertar o interesse da burguesia que se firmava como nova classe dominante.

Além desses aspectos socioeconômicos da época de Galileu, concordamos em orientar nosso trabalho segundo a interpretação de Mariconda (2006a) concernente às quatro características fundamentais da modernidade científica encontrada nos feitos de Galileu, a saber: “centralidade da ação prática e instrumental; confluência e união da ciência e da

técnica; matematização e mecanização da natureza; liberdade de pensamento ancorada no método” (MARICONDA, 2006a, p. 267).

Apesar de muitos estudos reforçarem a importância do ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, o que é muito bom para o Ensino de Física, no cotidiano das aulas, os alunos continuam com atitudes de “senso comum” que fogem da lógica galileana. Para tentar resolver esse “senso comum” sobre a queda dos corpos, precisamos nos esforçar para que nossos alunos adotem uma atitude mais voltada à ciência galileana, como em MARICONDA (2006a):

O que caracteriza a atitude científica galileana – e também a atitude científica moderna – é a procura, na natureza, de regularidades matematicamente expressáveis, as chamadas **leis da natureza**, e o método de certificar-se de sua verdade através da realização de **experimentos** (MARICONDA, 2006a, p. 269).

Para Mariconda (2006a), o homem medieval possuía uma atitude contemplativa em relação à natureza, enquanto o homem moderno do século XVII expressava uma atitude ativa, de dominação da natureza. No entanto, Galileu sofreu uma resistência dos seus pares nas universidades e da própria Igreja Católica, sendo esta entendida como força econômica feudal e maior detentora das terras da Europa, pois Galileu possuía uma atitude ativa na interpretação dos fenômenos naturais, enquanto os professores de sua época seguiam o cânone científico medieval.

A doutrina aristotélica, garantida pela autoridade dos séculos, consagrada por sua união à teologia católica e devido a sua conclusiva organicidade de princípios, permanecia como o fundamento sólido de toda educação teórica nas universidades, como o critério indiscutível de verdade para o mundo dos doutos, e seu autor, Aristóteles, como a autoridade incontestada nas ciências (MARICONDA, 2006a, p. 274).

Reforçando a diferença entre uma atitude ativa *versus* uma atitude contemplativa em relação à natureza, Hessen (1993) observou que as universidades feudais de doutrina aristotélica combatiam a nova ciência que florescia no século XVII:

Aquilo que não se encontrava em Aristóteles, para elas [universidades feudais] simplesmente não existia. Quando o padre Kircher (princípios do século XVII) sugeriu a um professor provincial jesuíta que observasse, através do telescópio, as recém-descobertas manchas solares, este respondeu: “É inútil, meu filho. Eu li Aristóteles duas vezes e não encontrei nada em suas obras sobre manchas no sol. Não existem tais manchas. Elas aparecem devido a imperfeições de seu telescópio ou a defeitos de seus próprios olhos”. Quando Galileu inventou o telescópio e descobriu as fases de Vênus, as companhias mercantis interessaram-se por seu telescópio, que era superior àqueles feitos na Holanda; mas os filósofos escolásticos das universidades se recusaram a ouvir falar nas novas descobertas (HESSEN, 1993, p.45).

Há outro aspecto de grande relevância na revolução científica do século XVII: a união entre ciência e técnica. Mariconda (2006a) relatou que para o mundo medieval, a ciência, estritamente teórica, era vista como superior à técnica, que era exercida, sobretudo, nas escolas de artesãos, nas escolas de artistas e arsenais do Renascimento. A ciência e a técnica eram completamente separadas e independentes, a doutrina aristotélica não tinha preocupação com consequências práticas e técnicas do cotidiano.

Já a ciência de Galileu unia a ciência e a técnica, mas não apenas no sentido de possuir resultados práticos, ou melhor, de estabelecer um tratamento matemático a situações físicas de caráter prático, mas também de ter a capacidade de ser controlada, testada e avaliada por esses efeitos práticos (MARICONDA, 2006a).

É bastante oportuno atribuir a Galileu a fundação da física clássica e do método experimental, mas vale ressaltar que concordamos com Mariconda (2006a), em que:

Exceto por atribuir ao indivíduo mais do que ele pode efetivamente fazer, porque, com efeito, a criação da física clássica e a invenção do método experimental são processos histórico-sociais que dependem do concurso dos humanos. São, nesse sentido, coletivos, pois dependem, para efetivar-se, de colaboração e organização (MARICONDA, 2006a, p. 288).

Como vimos, a ciência é uma criação humana feita por pessoas inseridas em um determinado contexto socioeconômico. O florescimento da física galileana no momento de transição do feudalismo para o capitalismo mercantil é um bom exemplo para entendermos a física clássica como processo histórico-social.

3.2.2 O Experimento da Torre Pisa

Talvez a história da ciência mais famosa seja o lendário experimento do alto da Torre de Pisa feito por Galileu, um experimento que é revivido na maioria dos livros didáticos de física, textos e *sites* em todo o país. Crease (2002) pediu aos seus leitores da revista *Physics World*, em que é colunista, para que eles escolhessem os dez mais belos experimentos de física. Em segundo lugar ficou o experimento de queda livre que Galileu fez, supostamente, do alto da Torre Inclinada de Pisa. Um detalhe foi o experimento do plano inclinado que ficou em oitavo lugar. Isso mostra como as pessoas consideram os feitos de Galileu como os mais belos da física. Dos dez experimentos mais belos da história da física, dois são atribuídos a Galileu.

Apesar do apreço que os leitores dessa revista possuem sobre os experimentos de Galileu, é pouco provável que Galileu realmente tenha realizado o experimento da Torre de Pisa

Apesar de muitos historiadores da ciência considerar o evento da Torre de Pisa como falso, ainda se encontra em livros-texto do Ensino Médio a afirmação que Galileu realizou esse famoso experimento. Um exemplo recente está em um livro didático muito conhecido entre os professores de física, chamado *Física Conceitual* do professor de ensino médio do Hawaii, Paul Hewitt, que traz uma explicação sobre o evento da torre inclinada:

Foi Galileu, o mais importante cientista do século dezessete, quem deu prestígio à opinião de Copérnico sobre o movimento da Terra. Fez isso desacreditando as ideias de Aristóteles sobre o movimento. Embora não fosse o primeiro a apontar dificuldades nas concepções de Aristóteles, Galileu foi o primeiro a fornecer uma refutação definitiva delas através da observação e dos experimentos.

Galileu demoliu facilmente a hipótese de Aristóteles sobre a queda dos corpos. Conta-se que Galileu deixou cair da torre inclinada de Pisa vários objetos com pesos diferentes e comparou suas quedas. Ao contrário da afirmativa de Aristóteles, Galileu comprovou que uma pedra duas vezes mais pesada que outra não caía realmente duas vezes mais rápido. Exceto pelo pequeno efeito da resistência do ar, ele descobriu que objetos de vários pesos, soltos ao mesmo tempo, caíam juntos e atingiam o chão ao mesmo tempo. Em certa ocasião, Galileu presumivelmente teria atraído uma grande multidão para testemunhar a queda de dois objetos com pesos diferentes do topo da torre. A lenda conta que muitos observadores desta demonstração que viram os objetos baterem juntos no chão zombaram do jovem Galileu e continuaram a sustentar os ensinamentos de Aristóteles (HEWITT, 2015, p. 49, grifo nosso).

Apesar desse livro de Paul Hewitt ter sido reeditado e traduzido para várias línguas, tanto a primeira edição publicada em 1971 quanto a atual 12ª edição de 2015 apresentam essas curiosidades acerca de experimento na Torre de Pisa. Hewitt (2015) inicialmente fez uma saudação à figura de Galileu, como cientista mais importante do século XVII. Logo em seguida, relatou que Galileu “foi o primeiro a fornecer uma refutação definitiva” das ideias do movimento de Aristóteles “através da observação e dos experimentos”. Como já escrevemos, através de Mariconda (2006a), vimos que a ciência estudada nas academias na época de Galileu privilegiava a teoria aristotélica e colocava a técnica ou a experiência em segundo plano, isto é, havia um desprezo da técnica pelos professores peripatéticos.

No outro parágrafo, Hewitt (2015) segue a dizer que Galileu “demoliu facilmente” as ideias de Aristóteles sobre o movimento dos corpos. Pela leitura de Hessen (1993) a teoria dos movimentos vista como “verdade” pelos peripatéticos era a teoria de Aristóteles, tudo o que fosse contrário à interpretação aristotélica dos fenômenos naturais não recebia crédito perante o corpo docente das universidades. “Demoliu facilmente” poderia ser um termo válido na

compreensão moderna de ciência que temos atualmente, mas de maneira alguma foi “fácil” para Galileu convencer seus pares sobre a nova interpretação que ele tinha para o fenômeno da queda dos corpos.

Mesmo com o passar dos anos, o autor ainda não fez nenhuma correção acerca desse texto, pois este se encontra irretocável tanto na 9ª quanto na 12ª edições, que foram as edições que analisamos, além da primeira edição.

Podemos citar outro exemplo da lenda do experimento da Torre de Pisa, desta vez em Lederman (1993). Leon Lederman foi um físico experimental de reputação internacional, laureado com Nobel de física em 1988, que aceitou a lenda da Torre de Pisa como um evento midiático:

A proeza na Torre Inclinada de Pisa foi dirigida a esse grupo [aristotélicos]. Hawking está certo de que não teria sido uma experiência ideal. Mas foi um evento. E, como em qualquer evento encenado, Galileu sabia de antemão como isso ia sair. Posso vê-lo subindo a torre na escuridão total às três da manhã e jogando um par de bolas de chumbo para seus assistentes de pós-doc. “Você deve sentir as duas bolas batendo na sua cabeça ao mesmo tempo”, ele grita para seu assistente. “Grite se a bola maior bater primeiro em você.” Mas ele realmente não precisava fazer isso, porque ele já havia raciocinado que as duas bolas deveriam atingir o chão no mesmo instante (LEDERMAN, 1993, p. 73-74).

Lederman (1993) ressaltou em dizer que Galileu já sabia o resultado da queda das duas bolas antes mesmo de realizar essa experiência, porém cita como verdadeira a lenda da queda dos corpos na Torre de Pisa. Curioso que a seção intitulada desse capítulo é, tradução nossa, “A verdade da Torre” (*The Truth of the Tower*), demonstrando a aceitação do evento na Torre de Pisa.

Persistindo em mais exemplos sobre a lendária história do experimento da Torre de Pisa, mas dessa vez analisando um exemplo mais antigo:

Membros da Universidade de Pisa, e outros espectadores, estão reunidos no espaço ao pé da maravilhosa torre inclinada de mármore branco naquela cidade em uma manhã no ano de 1591. Um jovem professor [Galileu] sobe a escada em espiral até chegar à galeria superando a sétima fileira de arcos. As pessoas abaixo o observam enquanto ele equilibra duas bolas na borda da galeria, uma pesando cem vezes mais que a outra. As bolas são liberadas no mesmo instante, e são mantidas juntas quando caem no ar até que se ouve atingirem o chão no mesmo instante. A natureza prova sem sombras de dúvidas e dá uma resposta imediata a uma questão debatida por dois mil anos.

"Esse homem intrometido, Galileu, deve ser suprimido", murmuraram os pais da universidade ao saírem da praça. “Ele acha que, ao nos mostrar que uma bola pesada e uma leve caindo simultaneamente no chão, pode abalar nossa crença na filosofia que ensina que uma bola pesando cem libras cairia cem vezes mais rápido que uma pesando uma libra? Esse desrespeito pela autoridade é perigoso e veremos que ela não vai mais longe”. Assim, eles

voltaram para seus livros para explicar a evidência de seus sentidos; e odiavam o homem que perturbava suas serenidades filosóficas. Para colocar a crença à prova do experimento, e fundamentar as conclusões após a observação, a recompensa de Galileu em sua velhice foi à prisão pela Inquisição, e um coração partido. É assim que um novo método científico é reconhecido pelos guardiões da doutrina tradicional (GREGORY, 1917, p. 2-3, grifo nosso).

Neste texto de 1917, Sir Richard Gregory credita um caráter infalível ao experimento aplicado na época de Galileu, como se o simples ato de soltar duas bolas de cima da torre (sem contar que seria um esforço hercúleo acreditar que uma pessoa conseguisse levar uma bola de cem libras até o alto de uma torre) oferecesse uma prova definitiva respondida pela natureza.

Como Paul Hewitt e Leon Lederman, brilhantes profissionais nas suas respectivas áreas da física, continuaram a reproduzir essas histórias sem um determinado escrutínio histórico da ciência? Como vimos anteriormente, tanto um século atrás, como nos dias de hoje, ainda se tem exemplos equivocados sobre o suposto evento na Torre de Pisa. Deixa claro, então, que é pertinente analisarmos as obras originais que mencionam o experimento da Torre de Pisa.

Uma das mais famosas narrativas dessa história da ciência conta que Galileu, em 1590, subiu ao topo da Torre Inclinada de Pisa, e lá do alto soltou dois objetos de pesos diferentes, com a finalidade de contestar a lei da queda de Aristóteles, lei esta que afirmava que a velocidade de queda dos corpos é proporcional ao seu peso. Com esta exposição do alto da Torre Inclinada, Galileu demonstrou aos professores e alunos reunidos em volta da torre que Aristóteles estava errado.

De acordo com Segre (1989), esta história deve ter pouca importância para a ciência ou para a história da ciência, pois o experimento não teve impacto no pensamento de Galileu; se realmente ocorresse, teria sido apenas uma exibição pública e Galileu não teria subido ao topo da torre sem conhecer o resultado antecipadamente.

Entretanto, a demonstração do evento da Torre de Pisa tem sido frequentemente considerada como uma reviravolta na história da ciência, e muitos autores que acreditam que a ciência de Galileu era principalmente empírica a reproduziram como um exemplo clássico da superioridade da ciência empírica sobre a ciência a priori. Mesmo apesar do fato de que a história da Torre de Pisa nunca foi mencionada em quaisquer escritos de Galileu e nem há evidência de que ele tenha narrado essa história. A história da Torre de Pisa foi descrita 12 anos após a morte de Galileu por Vincenzo Viviani (1622-1703), um de seus mais próximos

alunos e colaboradores, como parte de uma biografia de Galileu escrita em 1654 e inicialmente publicada postumamente em 1717 (SEGRE, 1989).

A partir do final do século XIX, historiadores da ciência começaram a interpretar que Viviani distorcera a imagem de Galileu, inclusive a suposta história da Torre de Pisa, e que sua biografia sobre Galileu não correspondia com veracidade às finalidades da história moderna da ciência. A lenda do experimento da Torre de Pisa tornou-se famosa depois de 1935, quando Lane Cooper (1875-1959) professor de língua e literatura inglesa da Universidade de Cornell nos EUA, escreveu seu famoso livro “*Aristotle, Galileo and the Tower of Pisa*” mostrando como a história de Viviani não era apoiada por evidências históricas e eram histórias fictícias, inventadas (SEGRE, 1989).

A história sobre Galileu e a Torre Inclinada de Pisa apareceu pela primeira vez em uma biografia de Galileu escrita por Vincenzo Viviani, o primeiro biógrafo de Galileu que o serviu em seus últimos anos de cegueira e prisão domiciliar, de 1639 até a morte de Galileu em 1642. Viviani, como já dissemos, redigiu sua biografia em 1654 (embora não tenha sido publicado até 1717), descreveu eventos que supostamente ocorreram seis décadas antes, mas que ele mesmo não testemunhou:

Naquele tempo (1589-1590), ele [Galileu] estava convencido de que a investigação dos efeitos da natureza exige necessariamente um conhecimento verdadeiro da natureza do movimento, de acordo com o axioma ao mesmo tempo filosófico e conhecido *ignorato motu ignoratur natura* [a ignorância do movimento significa a ignorância da natureza]. Foi então que, para grande indignação de todos os filósofos, ele demonstrou - com o auxílio de experiências, provas e raciocínios exatos - a falsidade de numerosíssimas conclusões de Aristóteles sobre a natureza do movimento, conclusões que, até então, eram tidas como perfeitamente claras e indubitáveis. Assim, entre outras, a de que as velocidades de móveis da mesma matéria, mas desigualmente pesados e movendo-se através do mesmo meio, não obedecem a proporção de seus pesos, como é declarado por Aristóteles, mas se movem, todos, com a mesma velocidade. O que demonstrou em repetidas experiências, feitas no alto do campanário de Pisa, na presença de todos os outros professores e filósofos e de toda a Universidade. [Demonstrou também] que as velocidades de um mesmo móvel que cai, atravessando diferentes meios, não obedecem tampouco a proporção inversa da densidade desses meios, deduzindo-o a partir de consequências manifestamente absurdas e contrárias à experiência sensível. (VIVIANI, apud COOPER, 1935, p. 26)¹.

¹ Esse trecho de Viviani foi traduzido também pelo importante filósofo da ciência Alexandre Koyrè (1982 [1937], p. 200-201) que defendia um Galileu “platônico”, quer dizer, que o cientista italiano jamais tivera feito os experimentos, que os feitos de Galileu ficaram restritos à física-matemática. Já outro importante nome que trabalhou com esse mesmo texto de Viviani, o historiador da ciência Stillman Drake defendia uma visão mais experimentalista de Galileu, como pode ser visto em Drake (1978, p. 19-20). Queremos destacar que o mesmo texto de Viviani foi traduzido por renomados especialistas, mas com diferentes visões às descobertas de Galileu.

Em 1937, Alexandre Koyré, matemático, filósofo e historiador da ciência, escreveu que os afamados experimentos da Torre de Pisa jamais foram feitos por Galileu: “o próprio relato de Viviani sobre a experiência de Pisa não se baseia em coisa alguma. As experiências de Pisa são um mito” (KOYRE, 1982, p. 200, grifo nosso).

O registro do experimento da Torre de Pisa feito por Galileu consta apenas nos registros de Viviani, não há relatos, por exemplo, como seria de esperar para um acontecimento público dessa importância, registros oficiais da Universidade de Pisa (MARICONDA e VASCONCELOS, 2006b). Vincenzo Renieri, discípulo de Galileu, professor de matemática em Pisa, escreveu uma carta a Galileu afirmando que ele (Renieri) realizara experimentos soltando objetos da Torre de Pisa e pediu a Galileu que os interpretasse. Renieri escreveu:

Aqui tivemos ocasião de fazer um experimento de dois pesos caindo de uma altura, de material diverso, ou seja, de madeira e um de chumbo, mas do mesmo tamanho; porque um certo jesuíta [Niccolò Cabeo] escreveu que eles descem ao mesmo tempo e com igual velocidade alcançam a Terra; e certo inglês afirma que Liceti aqui estabeleceu um problema e deu a explicação disso. Mas finalmente encontramos o fato pelo contrário, porque do cume do Campanário da Catedral [em Pisa], entre a bola de chumbo e a bola de madeira, ocorrem pelo menos três côvados de diferença. Experimentos também foram feitos com duas bolas de chumbo, uma do tamanho igual a uma bala de canhão e a outra do tamanho de uma bala de mosquete, e viu-se que, quando a maior e a menor caem da altura desse mesmo campanário, a maior precede a pequena de um palmo. (RENIERI, apud COOPER, 1935, p. 31)².

Nem todas as cartas da correspondência entre Renieri e Galileu foram preservadas, mas aquelas que existem não mostram evidências de que Galileu tenha realizado o experimento por si mesmo. Galileu já tinha discutido o assunto da queda dos corpos em seu trabalho sobre as *Duas Novas Ciências*. Mas, na verdade, Galileu não se referia a nenhuma torre específica e discutiu apenas experimentos mentais (SEGRE, 1989).

Já foi visto que há dúvidas consideráveis de que Galileu tenha realizado o experimento da Torre de Pisa (COOPER, 1935). Outra dificuldade é que, se Galileu tivesse realmente feito o experimento, os resultados teriam sido bastante confusos. Casper (1977) encenou o experimento da Torre de Pisa utilizando uma bola de softball e um projétil de 7 kg que foram soltos simultaneamente de uma altura de cerca de 60 m. O projétil atingiu o solo de 6 a 9 m à frente da bola de softball.

Pela visão de Franklin (1979), se Galileu realmente tivesse feito o experimento, o resultado estaria em desacordo com a previsão aristotélica, de que a velocidade da queda era

² Essa citação também foi analisada por Koyré (1982, p. 203) e por Drake (1978, p. 414).

proporcional ao peso do objeto, e da previsão do próprio Galileu, de que os objetos caem em taxas idênticas, independentemente do seu peso. Este resultado certamente teria colocado problemas para qualquer teoria então existente.

Tanto para Koyre (1982) quanto para Segre (1989), certamente Galileu não fez o experimento da Torre de Pisa. Entretanto cabe explicar uma pergunta feita por Segre (1989): “*Por que Viviani achava importante relatar esse experimento?*”.

Segundo Segre (1989), Viviani escrevia durante uma época em que uma biografia tinha que seguir certos padrões, como os adotados por Giorgio Vasari (1511-1574), o pintor e arquiteto maneirista que escreveu o *Vite*, a mais famosa coleção de biografias da história da arte. Um dos elementos recorrentes nesse estilo de biografia é o embelezamento da imagem do artista por meio de anedotas, muitas vezes inventadas. O importante, então, era embelezar a imagem de Galileu, mesmo que por meio de histórias inventadas. Mas até mesmo esse embelezamento estava sujeito a certas regras, ditadas pelos gostos do público de Viviani. Um público geral educado, muitos da nobreza, do clero e das universidades. Esse público preferia ouvir sobre coisas físicas práticas, em vez de questões matemáticas abstratas. Um bom exemplo desse acontecimento é a carta de 1642 de congratulações que Cavalieri fez a Torricelli, ambos seguidores de Galileu, pela admissão na Academia della Crusca, que além das congratulações, Cavalieri deu conselhos e mencionou as expectativas dos membros dessa academia:

Eu ouvi dizer que eles esperam coisas físicas, e não matemáticas, e talvez eles estejam certos, pois os primeiros assemelham-se mais ao joio [crusca], enquanto o segundo é a farinha - a verdadeira comida e nutrição do intelecto. É aconselhável atender a expectativa deles e, mais do que isso, a expectativa do público em geral que tem pouca estima pela matemática, a menos que veja algumas aplicações (SEGRE, 1989, p. 447).

Assim, tanto Torricelli e quanto Viviani tiveram que se adaptar a essas expectativas e tentar apresentar uma imagem da ciência tão prática e “tangível” quanto possível. E uma descrição como a experiência da Torre de Pisa, verdadeira ou não, era exatamente o que o público de Viviani gostaria de ouvir (SEGRE, 1989). A história do experimento da Torre de Pisa é falsa, mas o intuito desse relato feito por Viviani era provar algo maior, era refutar Aristóteles, em particular afirmação aristotélica de que a velocidade de queda de um corpo é proporcional a seu peso, ou seja, quanto mais pesado, maior a velocidade de queda. Ora, é de se admitir que não há como negar que, se alguém fizer tal experimento, chegará inevitavelmente à conclusão de que a suposição aristotélica é falsa. E por outro lado, hoje em dia já é trivial fazer ensaios de queda de objetos no vácuo.

Viviani, ao descrever a história da Torre de Pisa, não estava escrevendo como cientista ou como historiador da ciência, mas como um escritor, dirigindo-se a um público interessado em literatura. Ele deve ser elogiado por ter conseguido produzir tal prosa, com tanta verdade nela. E, como Lane Cooper deixou claro em sua obra, ele é provavelmente mais confiável como historiador da ciência do que muitos historiadores modernos da ciência que amplificaram o que ele escreveu. Assim como é importante reconhecermos o experimento da Torre de Pisa como mito e não como fato histórico, para não sermos convencidos por argumentos de autoridades no assunto, também é válido de se levar em consideração o contexto literário que vivia Viviani ao se escrever essa lenda (SEGRE, 1989). Vale lembrar que o sucesso dessa lenda ser contada há mais de 300 anos, pode ser creditado à prosa de Viviani ao confrontar a complexidade de mundos científicos diferentes, como os aristotélicos e galileanos, que se confrontaram além da ciência, em um experimento aparentemente muito simples visto a olho nu.

3.3 CONTEÚDO DE FÍSICA PRESENTE NAS *DUAS NOVAS CIÊNCIAS*

Os *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze (Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas Novas Ciências)*, tratado daqui em diante como *Duas Novas Ciências*, escrito por Galileu Galilei (1564-1642) e publicado em 1638, foi um marco na história da ciência. Essa obra marcou o nascimento da Ciência Física nos moldes modernos. Galileu interpretou as duas novas ciências, a resistência dos materiais e o movimento dos corpos, utilizando a geometria aliada com a experimentação, sem a necessidade de conciliar suas pesquisas com a doutrina aristotélica defendida pela Igreja.

A obra *Duas Novas Ciências* foi escrita na forma de diálogos, Galileu utilizava essa forma de escrita platônica muito difundida no Renascimento. Esse recurso dialógico facilitou a retórica de Galileu para discutir nesta obra os principais pontos de discordância com a física aristotélica tradicional.

Os três personagens de outra importante obra de Galileu, *Dialogo sopra i Due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano (Diálogo sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano)*, publicada em 1632, são os mesmos das *Duas Novas Ciências*. São, praticamente, personagens reais. O primeiro deles, Felipe Salviati (1582-1614), nobre florentino, foi amigo íntimo de Galileu. Giovanfrancesco Sagredo (1571-

1620), também seu amigo, era um diplomata que tinha grande interesse às questões científicas da época. Simplício, o terceiro interlocutor, foi um filósofo grego neoplatônico do século VI d.C, também conhecido como um dos mais importantes comentadores de Aristóteles (MARICONDA, 1988).

Esses três personagens, embora sejam os mesmos do *Diálogo*, apresentam diferentes discursos entre os interlocutores do *Diálogo* e das *Duas Novas Ciências*. No *Diálogo*, Salviati representa o novo cientista que combina intuição e experimentação com apurado conhecimento matemático. Salviati retrata, assim, o próprio Galileu, em seus diálogos e a maneira de filosofar. Sagredo representa o homem prático que faz uso da nova ciência para tornar suas ações mais eficazes, tanto no progresso material, quanto no espiritual. Sagredo simboliza a mentalidade progressista e não-dogmática nascida do Renascimento. Ele tem o papel de árbitro entre as posições de Salviati e Simplício. Porém, nem sempre se apresenta imparcial, pois mostra entusiasmo pelas novas ideias. Simplício serve a dois propósitos: ele é uma referência a Aristóteles, sua Filosofia e sua Física; e também simboliza os professores peripatéticos dogmáticos que tinham o controle do ensino oficial. Simplício representa tanto a tradição quanto o dogmatismo. Tradição no sentido da complexidade da cosmologia aristotélico-ptolomaica e dogmatismo no sentido de enrijecer o pensamento ao buscar novas evidências que possam ser conciliadas à filosofia de Aristóteles (MARICONDA, 1988).

Nas *Duas Novas Ciências*, Galileu não é representado somente por Salviati, que ao ler o texto de Galileu, começa a expressar posições e dúvidas próprias. Sagredo também retrata Galileu em muitas questões levantadas e que não são respondidas por Salviati. No entanto, a mudança de Simplício é mais evidente: ele não defende mais as velhas teorias, mesmo continuando a ser um peripatético; geralmente, ele é convencido por Salviati. Isto traduz o objetivo das *Duas Novas Ciências*, que é somente a exposição de duas novas ciências e não o debate sobre questões tradicionais como no *Diálogo*. Diante da novidade, Simplício apresenta agora ingenuidade do senso comum. Entretanto, quando encontra dificuldade em entender as demonstrações matemáticas do tratado sobre o movimento, chega a queixar-se de não ter estudado Geometria antes de aplicar-se à Filosofia (MARICONDA, 1988).

O conteúdo das *Duas Novas Ciências* foi composto originalmente por quatro jornadas. A seguir trataremos de cada uma com mais detalhes.

A primeira jornada pode ser dividida em duas partes e é considerada como uma introdução às duas novas ciências que serão aprofundadas nas próximas jornadas. Na primeira parte, Galileu trata de questões a respeito da resistência dos materiais. Galileu aplica seu conhecimento sobre geometria para explicar o paradoxo de que a resistência das partes de

uma máquina tende a diminuir ao invés de aumentar ou conservar-se, quando ampliada suas dimensões. Galileu também trata da estrutura da matéria, principalmente dos fatores que mantêm os sólidos coesos. Na segunda parte, Galileu explica o movimento do pêndulo e a queda livre de corpos utilizando novamente a geometria para estudar o movimento uniformemente acelerado. Seu empenho é de aplicar a física-geométrica como método de explicação dos problemas práticos.

A segunda jornada trata da primeira nova ciência enunciada no título da obra, a resistência dos materiais nos problemas relacionados à Estática. A importância dessa jornada pode ser reconhecida pela perspectiva metodológica, pois com base no princípio da alavanca de Arquimedes, Galileu utiliza da matemática para um problema físico.

A terceira e quarta jornadas tratam da segunda nova ciência: a Dinâmica. Na terceira jornada, Galileu utiliza a geometria para analisar as teorias do movimento uniforme e do movimento uniformemente acelerado. Galileu usa desse recurso matemático para explicar o movimento da queda dos corpos. Em seguida, constrói um plano inclinado e um pêndulo, para provar sua hipótese de que o movimento de um corpo é caracterizado pelas leis geométricas do movimento uniformemente acelerado.

Na quarta jornada, Galileu emprega as leis do movimento na trajetória parabólica do movimento dos projéteis, desenvolvendo esse tipo de movimento em dois, como composto por um movimento uniforme na horizontal e por um movimento uniformemente acelerado na vertical.

Podemos mencionar que as *Duas Novas Ciências* mostram que Galileu foi o primeiro físico no sentido moderno, pois foi o primeiro a compreender que as ideias copernicanas não se limitavam apenas às evidências astronômicas, mas também se aplicavam às leis da Mecânica. Galileu, portanto, buscava construir uma física unificada em que as leis do movimento seriam universais atendendo tanto à astronomia quanto à Mecânica (MARICONDA, 1988).

Como já foi dito, as *Duas Novas Ciências* foi uma obra muito importante para o nascimento da física nos moldes modernos. Partindo da ideia galileana de união da teoria com a técnica, utilizamos alguns pontos-chave para o andamento do nosso trabalho com os estudantes presentes nas *Duas Novas Ciências*, que podem ser relacionados ao lendário experimento da Torre de Pisa:

- O experimento mental das pedras conjugadas;
- Espaço percorrido proporcional aos quadrados dos tempos;
- Espaços percorridos em tempos iguais estão entre si como a série de números ímpares;

- A velocidade é proporcional ao tempo no movimento uniformemente acelerado.

Galileu utilizava experimentos mentais para explicar determinado fenômeno natural. Na primeira jornada das *Duas Novas Ciências*, Galileu elabora um experimento mental da queda de duas pedras de diferentes pesos unidas a uma corda, que pode ser relacionado ao experimento mítico da Torre de Pisa. Suponhamos que duas pedras, uma bem mais pesada que a outra, soltas da mesma altura, caem do alto da Torre de Pisa. Há apenas três possibilidades para descrever a queda dessas pedras. A pedra mais pesada cai mais rapidamente que a pedra leve, a pedra mais leve cai mais rapidamente do que a pesada, ou as duas pedras caem com a mesma velocidade. Pela física de Aristóteles, objetos pesados caem mais rapidamente que os leves na proporção de seus respectivos pesos. Agora, consideremos que as duas pedras caem do alto da Torre de Pisa, mas agora, são atadas a uma corda. Nessa analogia, podemos inferir que a pedra mais pesada cai puxando a mais leve e esta cai mais rapidamente se estivesse desamarrada. Quer dizer, com a pedra mais leve agindo como um paraquedas tendendo a retardar a pedra mais pesada. Desta maneira, o corpo conjugado a corda deve cair mais rapidamente que a pedra mais leve sozinha, e mais lentamente que a pedra mais pesada. Porém o corpo conjugado é certamente mais pesado do que a pedra pesada e, como consequência, deveria cair mais rápido do que a pedra pesada, segundo Aristóteles. Então, nesse experimento mental, Galileu colocou a física aristotélica em contradição lógica e solucionou esse quebra-cabeça nas *Duas Novas Ciências*:

Se verificarmos efetivamente que os móveis de diferentes pesos específicos diferem cada vez menos em velocidade à medida que os meios são cada vez menos resistentes e que, finalmente, embora extremamente desiguais em peso, no meio mais tênue, ainda que não vazio, a desigualdade das velocidades é pequeníssima e quase inobservável, parece-me que poderemos admitir, como conjectura altamente provável, que no vazio suas velocidades seriam totalmente iguais (GALILEI, 1988, p. 69, grifo nosso).

Galileu não fez o experimento da Torre de Pisa, pois sabia que a resistência do ar influenciaria no movimento da queda de objetos.

Na terceira jornada, Galileu trata do movimento uniforme e do movimento uniformemente acelerado. Já na primeira página da terceira jornada, Galileu faz uma introdução citando seus feitos em relação ao movimento. Desta jornada, trabalhamos com os estudantes a teoria da queda dos corpos, (1) utilizando a dependência que o espaço percorrido pelo corpo em queda tem em ser proporcional aos quadrados seus tempos, e (2) dos espaços percorridos em tempos iguais estar entre si como a série de números ímpares de um móvel em queda.

Vamos expor uma nova ciência a respeito de um tema muito antigo. Não existe na natureza nada anterior ao MOVIMENTO e, com referência a ele, não poucos e pequenos volumes foram escritos pelos filósofos; apesar disso muitas propriedades dignas de serem conhecidas não foram até o momento nem observadas, nem demonstradas. Observaram-se algumas mais simples, como, por exemplo, que o movimento natural dos graves em queda livre se acelera continuamente; porém, não foi demonstrada até o momento a proporção segundo a qual se produz sua aceleração. Também não foi demonstrado, que eu saiba, que um móvel, que cai a partir do repouso, percorre em tempos iguais espaços que mantêm entre si a mesma proporção que têm os números ímpares sucessivos a partir da unidade (GALILEI, 1988, p. 153).

Mais adiante nas *Duas Novas Ciências*, Galileu utiliza o teorema da velocidade escalar média v_m do movimento uniformemente acelerado para apresentar sua teoria de queda dos corpos:

O tempo no qual um espaço é percorrido por um corpo que parte do repouso uniformemente acelerado é igual ao tempo no qual esse mesmo espaço seria percorrido pelo mesmo corpo como velocidade constante, de valor igual à metade do maior e último valor alcançado no movimento uniformemente acelerado (GALILEI, 1988, p. 170).

Dessa maneira, podemos colocar em equação o que o Galileu disse. A velocidade escalar média desse corpo é igual à metade da velocidade final v nesse intervalo de tempo, ou seja,

$$v_m = \frac{v}{2} \quad (3.2)$$

Uma vez que a velocidade média é definida como

$$v_m = \frac{d}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Sendo d a distância percorrida pelo corpo no tempo Δt , então a distância d e a velocidade final v podem ser relacionadas como:

$$d = \frac{v}{2} \Delta t \quad (3.4)$$

Essa seria a mesma distância percorrida por um corpo no intervalo de tempo Δt , que se deslocasse em movimento retilíneo e uniforme com velocidade então constante igual a $\frac{v}{2}$.

Continuando nas *Duas Novas Ciências*, Galileu enuncia o Teorema II – Proposição II:

Se um móvel, partindo do repouso, cai com um movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados desses mesmos tempos (GALILEI, 1988, p.171).

Pelo teorema II, no movimento uniformemente variado, como a aceleração escalar é a mesma em todos os instantes, então seu valor coincide com a aceleração escalar média:

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (3.5)$$

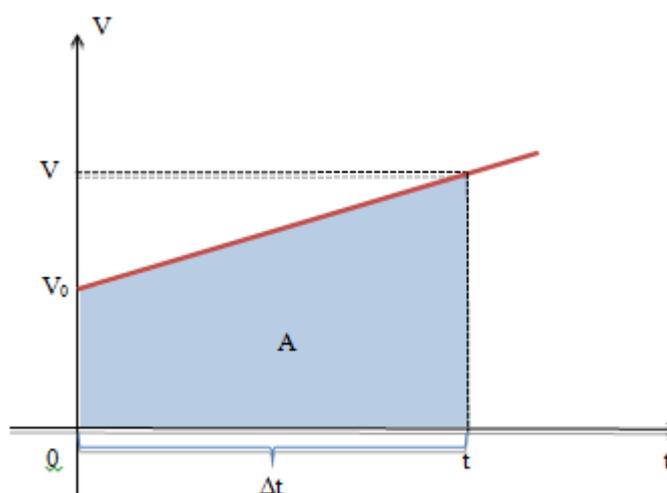
Em que Δv é a variação da velocidade diretamente proporcional ao intervalo de tempo Δt correspondente. Sendo v_0 a velocidade inicial, e v a velocidade num instante t , segue-se:

$$a_m = \frac{v - v_0}{t - 0} \quad (3.6)$$

$$v = v_0 + at \quad (3.7)$$

Para se provar que “os espaços percorridos estão numa proporção dupla, a saber, como os quadrados desses tempos” (GALILEI, 1988, p.171), podemos recorrer a partir do gráfico da velocidade do MUV da figura 3.6, para obtermos a função horária do espaço.

Figura 3.6 - Gráfico da velocidade do movimento uniformemente variado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como a velocidade é definida em termos da posição S do corpo, temos que:

$$v = \frac{dS}{dt} \quad (3.8)$$

$$dS = v dt \quad (3.9)$$

$$\int_{S_0}^S dS = \int_{t_0}^t v dt \quad (3.10)$$

$$\Delta S = S - S_0 = \int_{t_0}^t v dt \quad (3.11)$$

Nos mostra que a integral do lado direito da eq. (3.11) pode ser calculada a partir do gráfico v vs t .

A área do gráfico é um trapézio, assim calculamos:

$$\Delta S = \frac{(v_0 + v)}{2} \cdot \Delta t \quad (3.12)$$

Como $\Delta t = t - t_0 = t - 0$, então $\Delta t = t$. Substituindo $\Delta t = t$ e a eq. (3.7) na eq. (3.12), teremos:

$$\Delta S = \frac{(v_0 + at + v_0)}{2} \cdot t \quad (3.13)$$

$$\Delta S = v_0 \cdot t + \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad (3.14)$$

A área do gráfico pode ser considerada numericamente igual ao espaço percorrido ($\Delta S = S - S_0$):

$$\Delta S = v_0 \cdot t + \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad (3.15)$$

Considerando que o corpo em queda livre parte do repouso, então $v_0 = 0$ e a posição inicial $S_0 = 0$:

$$S = \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad (3.16)$$

Galileu não descobriu o valor absoluto da aceleração da gravidade³, ele conseguiu chegar à proporção do espaço com o tempo que pode ser escrita desse modo:

$$S = k.t^2 \quad (3.17)$$

A incógnita k então seria uma constante, que como já vimos representa a aceleração dividida por dois.

Utilizando mais uma vez a figura 3.6 pode-se demonstrar que a velocidade média no MUV, entre dois instantes, é igual à média aritmética das velocidades nos instantes considerados como já explicava Galileu nas *Duas Novas Ciências*. Sendo assim:

$$\Delta S = \frac{(v_0+v)}{2} \cdot \Delta t \quad (3.18)$$

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{(v_0+v)}{2} \quad (3.19)$$

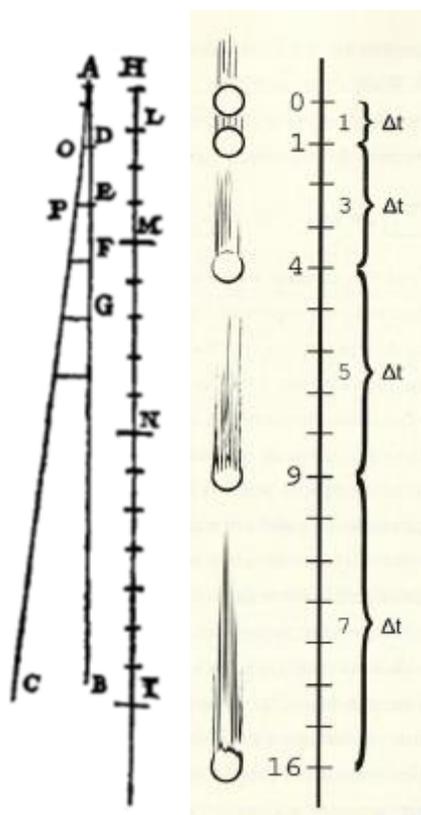
$$v_m = \frac{(v_0+v)}{2} \quad (3.20)$$

Mais adiante nas *Duas Novas Ciências*, de acordo com a análise geométrica da figura 3.7, Galileu exhibe que os espaços percorridos pelo móvel em movimento uniformemente acelerado estão em tempos iguais entre si como a série de números ímpares:

Daí segue-se, claramente, que se a partir do primeiro instante do movimento fossem tomados sucessivamente intervalos de tempos iguais, como por exemplo, AD, DE, EF, FG nos quais se percorrem os espaços HL, LM, MN, NI, estes espaços estariam entre si assim como os números ímpares a partir da unidade, a saber, 1, 3, 5, 7: esta é, com efeito, a proporção entre os excessos dos quadrados das linhas que se excedem igualmente, diferença essa que é igual à menor delas, ou seja, à proporção entre os quadrados dos números inteiros que se seguem à unidade. Quando, portanto, os graus de velocidade aumentam em tempos iguais, de acordo com a simples série dos números, os espaços percorridos em tempos iguais adquirem incrementos segundo a série dos números ímpares *ab unitate* (GALILEI, 1988, p.173).

³ Silveira (1995) destaca que foi Christian Huygens o primeiro a medir mais precisamente a aceleração gravitacional em 1659, 17 anos depois da morte de Galileu. Huygens encontrou o valor de aproximadamente de 9,5 m/s².

Figura 3.7 - Representação da queda de um móvel. À esquerda mostra a representação geométrica de um móvel em queda feita por Galileu. A vertical AB representa o tempo decorrido. Os segmentos na horizontal ao longo do segmento AB representa a velocidade adquirida até o instante correspondente no eixo dos tempos AB. O segmento vertical HI representa os espaços percorridos durante os tempos AB. De HI está representado à série ímpar dos espaços percorridos. A figura à direita deixa mais evidente essa relação da série ímpar.



Fonte: GALILEI (1988, p. 171) na figura à esquerda. MARICONDA e VASCONCELOS (2006b, p. 224) na figura à direita.

Galileu, apesar de estabelecer corretamente que os espaços estão entre si como os quadrados dos tempos, e de que os espaços percorridos em tempos iguais estão entre si como a série dos números ímpares, também formula o princípio errôneo de que, em termos modernos, a velocidade é proporcional ao espaço percorrido. Galileu escreve essa lei da queda em 1604, numa carta a frei Paolo Sarpi, assim se expressa Galileu:

Muito Reverendíssimo Senhor e Padre Colendíssimo. Repensando acerca das coisas do movimento, nas quais, para demonstrar as propriedades por mim observadas, me faltava um princípio totalmente indubitável para poder pô-lo como axioma, cheguei a uma proposição que é muito natural e evidente, e, suposta esta, demonstro a seguir o resto, isto é, que os espaços percorridos pelo movimento natural estão em proporção ao quadrado dos tempos, e por consequência os espaços percorridos em tempos iguais estão como os números ímpares ab unitate, e as outras coisas. E o princípio é este: que o móvel natural cresce em velocidade com aquela proporção em que se afasta do início de seu movimento (FAVARO apud MARICONDA, 1988, p. XIII, grifo nosso).

Essa formulação incorreta será corrigida na terceira jornada das *Duas Novas Ciências*, como pode ser lido assim:

Vemos, portanto, com este simples cálculo [geométrico], que os espaços percorridos em tempos iguais por um móvel que, partindo do repouso, vai adquirindo velocidade proporcionalmente ao aumento do tempo, estão entre si como os números ímpares *ab unitate* 1, 3, 5, etc.; e, se tomamos no seu conjunto os espaços percorridos, podemos verificar que o espaço percorrido num tempo duplo é o quádruplo do percorrido no tempo simples, o espaço percorrido num tempo triplo é nove vezes o espaço percorrido no tempo simples, e, numa palavra, os espaços percorridos estão numa proporção dupla, a saber, como os quadrados desses tempos (GALILEI, 1988, p. 174, grifo nosso).

Galileu fez uma formulação moderna da lei de queda dos corpos e a comprovou por meio da experiência do plano inclinado que os espaços percorridos pelo corpo é proporcional aos quadrados dos tempos. Galileu, engenhosamente, utilizou o plano inclinado em uma maneira de “suavizar” a queda dos corpos devido à impossibilidade pelos recursos experimentais da época de se fazer medições de distância e tempo de queda de um objeto na vertical. Galileu além de ser um professor universitário de matemática também tinha uma vasta habilidade em manipular equipamentos para realizar medidas. Foi dessa união entre a ciência e a técnica que contribuiu para uma ruptura com a ciência aristotélica.

3.4 O APARATO EXPERIMENTAL DE QUEDA VERTICAL

Fizemos o aparato experimental de queda vertical para trabalharmos com os estudantes o lendário experimento da Torre de Pisa e comprovarmos algumas contribuições de Galileu expostas no livro *Duas Novas Ciências*, tais como:

- O experimento mental das pedras conjugadas;
- Espaço percorrido proporcional aos quadrados dos tempos;
- Espaços percorridos em tempos iguais estão entre si como a série de números ímpares;
- Velocidade proporcional ao tempo decorrido;
- A influência da resistência do ar na queda vertical.

Para o movimento de queda vertical, fizemos o aparato semelhantemente ao produzido por empresas do ramo de laboratório de ensino, como, por exemplo, o sensor de movimento

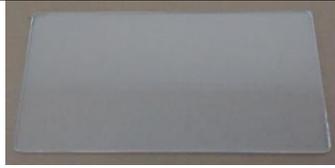
da PASCO⁴, empresa bem conhecida entre os professores de física. A vantagem do nosso aparato é que este é bem mais barato e tão confiável quanto os sensores de ultrassom dessas empresas. O sensor de movimento ultrassônico foi construído semelhantemente ao sugerido por Galeriu (2014). Este utilizou o mesmo sensor ultrassônico HC-SR04 juntamente com um Arduino UNO para se dedicar ao ensino do movimento harmônico simples com seus estudantes de ensino médio. Nesse trabalho, usamos o sensor para medir distâncias na vertical.

Para construir esse aparato foram necessários alguns materiais de fácil obtenção. A lista de materiais está logo abaixo na figura 3.8. Os itens de 1 a 7 podem ser encontrados em lojas de componentes eletrônicos sem grandes dificuldades. Na caixinha do sensor ultrassônico (4) foi feito dois furos para entrada do sensor. A placa de acrílico (8) foi confeccionada em lojas especializadas no tamanho especificado. Os itens de 10 a 15 são produtos comerciais encontrados em empresas do ramo. O valor total para confeccionar o aparato ficou em torno de 130 reais. Na lista de materiais está indicado o preço da maioria dos componentes.

O aparato experimental é relativamente fácil de montar e de transportar, sendo seu uso acessível seja em uma bancada de laboratório ou mesmo sobre uma carteira comum de sala de aula.

⁴ O sensor de movimento da empresa citada pode ser encontrado no endereço eletrônico https://www.pasco.com/prodCatalog/PS/PS-2103_pasport-motion-sensor/index.cfm. Acessado em 20 de novembro de 2018. Esse equipamento da PASCO tem um preço de 1700 reais atualmente.

Figura 3.8 - Lista de materiais com o preço médio especificado. Os produtos sem preço são de valor irrisório.

Nº	Nome do produto	Quantidade e preço	Figura
1	Arduino UNO	1 (R\$ 45,00)	
2	Sensor Ultrassônico HC-SR04	1 (R\$ 8,00)	
3	Sensor de temperatura DS18B20	1 (R\$ 8,00)	
4	Caixinha para o HC-SR04 (85x40x70mm)	1 (R\$ 5,00)	
5	Cabos de conexão macho- fêmea	4	
6	Cabo USB 2.0 (cabo de impressora)	1 (já vem com Arduino)	
7	Espaçadores de placa de circuito impresso M3x10mm	5	
8	Placa de acrílico (20x10x4 mm)	1 (R\$ 5,00)	
9	Parafusos M3x10mm	10	

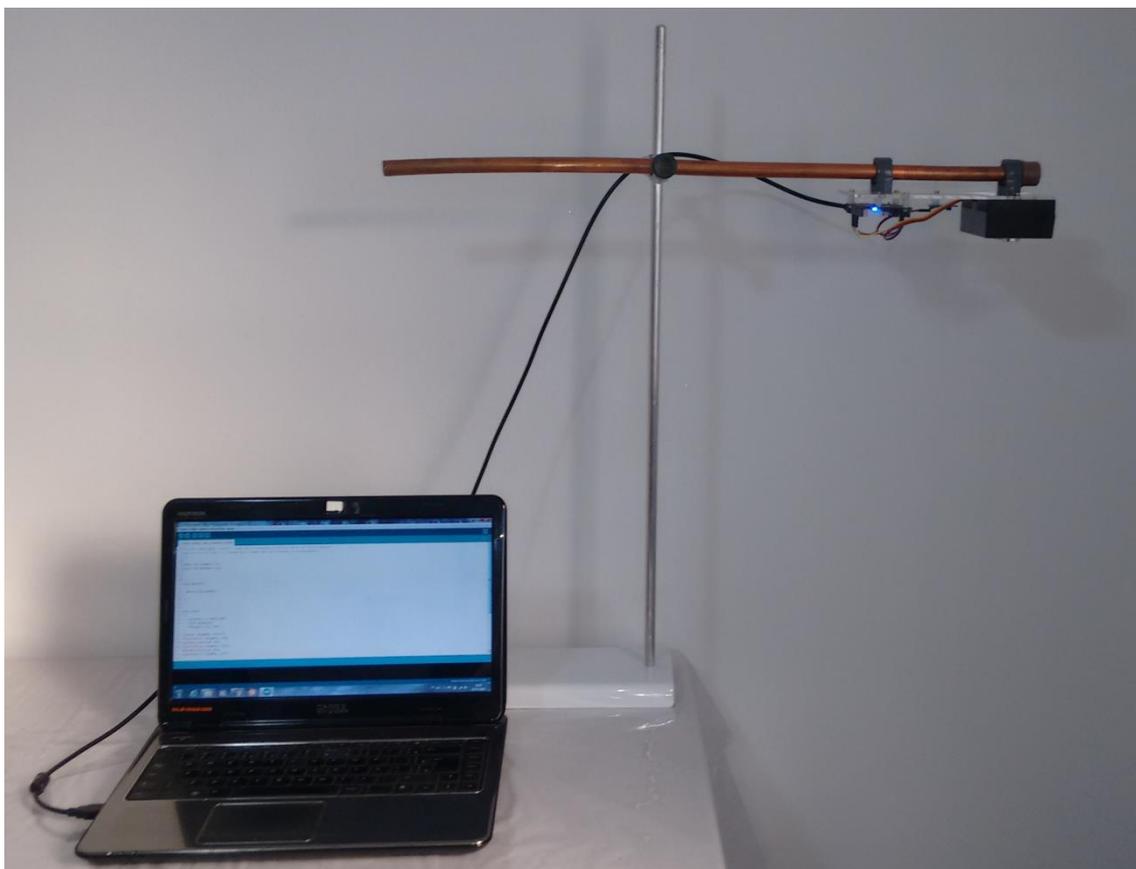
10	Suporte Universal	1 (R\$ 40,00)	
11	Mufa dupla	1 (R\$ 10,00)	
12	Tubo de cobre 5/8"	60 cm	
13	Abraçadeira para eletroduto de 20 mm	2	
14	Tubo pvc de 20 mm	2 pedaços de 10 mm	
15	Cap ("tampão") de 20 mm	1	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 3.9, tem-se o aparato experimental montado pronto para uso. O *notebook* já está com o programa instalado. A mufa dupla é usada para regular a altura do sensor ultrassônico no suporte universal. Utilizamos um tubo de cobre de 5/8 de polegada ao invés

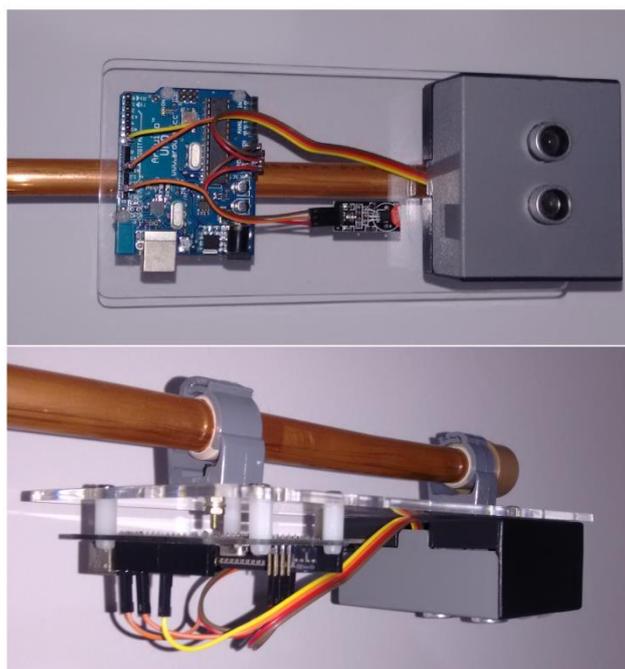
de um tubo de PVC de 20 mm, pois o encaixe da mufa dupla não é larga o bastante para encaixar um tubo de 20 mm de diâmetro. A mufa dupla é muito usada em experimentos em disciplinas de química e facilmente encontrado em lojas que vendem equipamentos para laboratório de ciências.

Figura 3.9 - Aparato experimental ultrassônico pronto para uso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 3.10 conseguimos ver, na vista de cima, montados na placa de acrílico, o Arduino UNO; o sensor ultrassônico HC-SR04 com os módulos transmissor e receptor vistos na caixinha; e o sensor de temperatura DS18B20. Nota-se a pouca fiação desse aparato experimental, facilitando a montagem do circuito. Na vista de baixo da mesma figura, devemos observar o tubo de cobre envolvido pelos dois pedaços de tubo de PVC de 20 mm presos pelas duas abraçadeiras de eletroduto.

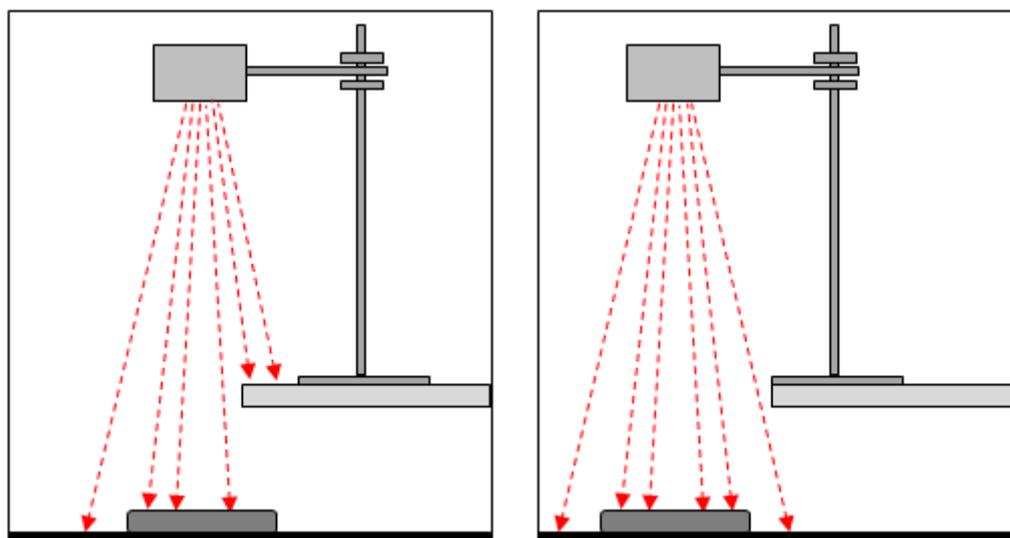
Figura 3.10 - Perfis do aparato ultrassônico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os demais equipamentos desse aparato não exigem tanto cuidado no momento de fazer as medições da queda de objetos. Já o sensor ultrassônico requer maior atenção. Antes de realizarmos o experimento simulando a queda de objetos da Torre de Pisa, é importante ajustar o sensor ultrassônico.

As medições de queda dos corpos foram realizadas com o sensor virado para baixo sempre perpendicular ao chão. Utilizamos as recomendações de MacIsaac e Hämäläinen (2002) para testar o sensor ultrassônico, como a utilização de uma toalha no chão para absorver ondas refletidas indesejadas; e colocar o sensor ultrassônico um pouco afastado do *notebook* caso se note alguma diferença nas medições por causa de interferências de outras ondas de ultrassom do meio, como lâmpada fluorescente e do próprio *notebook*. A onda de ultrassom do sensor é mais bem refletida se o objeto estiver dentro de campo de 15° de abrangência do ultrassom, conforme o manual do fabricante, então é muito importante usar o sensor afastado de paredes, mesas ou quaisquer obstáculos que estejam no campo de medição do sensor, como é mostrado na figura 3.11.

Figura 3.11 - À esquerda, a superfície de trabalho está sendo detectada antes do alvo, então os dados serão imprecisos. Na parte à direita, a bancada não interfere no sinal, desse modo os dados estarão mais confiáveis.



Fonte - Elaborado pelo autor.

A função do sensor é medir o tempo da propagação do sinal ultrassônico que sai do transmissor e retorna ao receptor. Um transmissor que gera ondas ultrassônicas e um receptor que percebe o eco. Como a velocidade de propagação do sinal é conhecida, então o sensor pode ser usado para medir distâncias entre o sensor e um objeto que reflete a onda ultrassônica.

A velocidade do som é dependente da temperatura do meio, então é desejável levar em conta a temperatura ambiente na qual as medições serão feitas. A velocidade do som nos gases aumenta com o aumento da temperatura. Para ser capaz de se adaptar rapidamente à mudança da temperatura ambiente, é necessário adicionar um sensor de temperatura ao sistema de medição e usar os resultados de suas medições. Para isso usamos um sensor de temperatura (DS18B20) acoplado ao Arduino para medir a temperatura e corrigir o valor da velocidade do som por meio do programa. A equação que usamos da velocidade do som com a temperatura está descrita abaixo:

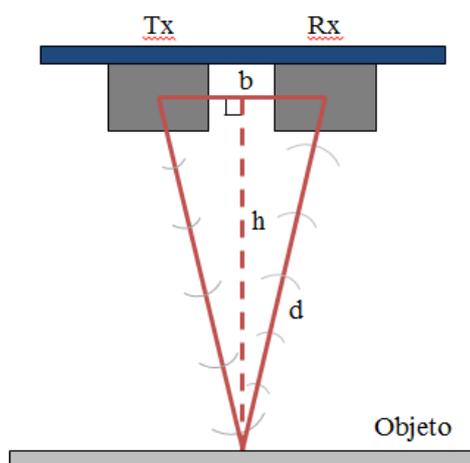
$$V = 331,0 + 0,6\Delta T, \text{ (Rossing, 2004)} \quad (3.21)$$

onde ΔT é dado em celsius e a velocidade de 331,0 m/s é a velocidade do som a 0 °C no ar seco. Com um aumento da temperatura do ar de 1 °C, a velocidade do som aumenta em 0,6 m/s. Então para fazer análises com o sensor ultrassônico é imprescindível corrigir a

velocidade pela temperatura, do contrário os registros de posições de queda não serão confiáveis.

Outro modo necessário para corrigir as medições é levar em conta o caminho da propagação do sinal ultrassônico. Como o transmissor fica ao lado do receptor, do ponto de vista geométrico, para encontrar a altura (h) entre o sensor e o objeto, é necessário aplicar o teorema de Pitágoras no triângulo isósceles da figura 3.12.

Figura 3.12 - Representação da propagação da onda ultrassônica do sensor HC-SR04.

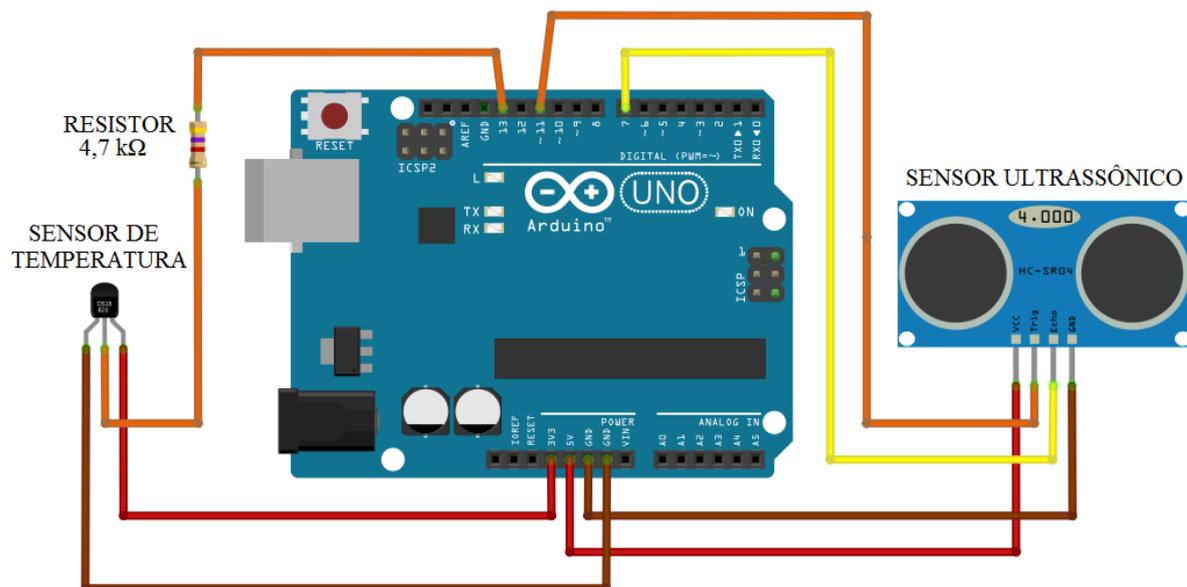


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta figura, h é altura entre o sensor e o objeto; b é a distância entre os centros do transmissor e do receptor do HC-SR04, que é de 2,6 cm; e d é a distância percorrida pela onda ultrassônica que sai do transmissor e chega ao receptor. Então para calcular a altura entre o sensor e o objeto, fizemos a triangulação desses valores:

$$h = \sqrt{(d^2 - 1,3^2)} \quad (3.22)$$

A variável d é o registro feito primeiramente pelo sensor ultrassônico, sendo h a correção da altura. A montagem do circuito eletrônico encontra-se na figura 3.13. O pino “echo” e o pino “trig” do HC-SR04 foram conectados aos pinos 7 e 11, respectivamente, do Arduino. O pino de sinal do sensor de temperatura (DS18B20), terminal intermediário, foi ligado no pino 13 do Arduino. As demais ligações são de alimentação.

Figura 3.13 - Circuito eletrônico do aparato ultrassônico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O programa (*sketch*) encontra-se na figura 3.14. Na posição quatro está a linha de programação que registra as posições e os tempos de queda do objeto em uma planilha chamada *serial monitor* do próprio programa do Arduino. Para encontrar boas medidas de altura entre o sensor e o objeto é necessário fazer ajustes na programação, como pode ser visto nas linhas 23 e 24 da figura 3.14. A linha 23 mostra a correção da velocidade de propagação da onda ultrassônica de acordo com a temperatura. Já a linha 24 mostra a correção da triangulação entre as distâncias que separam o transmissor de ultrassom (Tx) e o receptor de ultrassom (Rx) com o objeto. Colocamos um ciclo de medição de 20 ms no programa (linha 28) pois, na prática, foi o menor tempo que o sensor ultrassônico conseguiu registrar em uma altura de um metro.

Figura 3.14 - Programa para medir distâncias e seus respectivos tempos de queda.

```
1 const int echoPin = 7;
2 const int trigPin = 11;
3 void setup(){
4   Serial.begin(9600);
5 }
6 void loop()
7 {
8   unsigned int echo_time;
9   float distance;
10  float distance1;
11  unsigned long time;
12
13  pinMode (trigPin, OUTPUT);
14  digitalWrite (trigPin, LOW);
15  delayMicroseconds (10);
16  digitalWrite (trigPin, HIGH);
17  delayMicroseconds (10);
18  digitalWrite (trigPin, LOW);
19
20  pinMode (echoPin, INPUT);
21  echo_time = pulseIn (echoPin, HIGH);
22  time = micros();
23  distance = (echo_time/2)*0.0346; //Vsom = (331.0 + 0.6 T) m/s, onde T é a temperatura em °C
24  distance1 = sqrt(distance*distance - 1.3*1.3); // distância entre transmissor e receptor
25  Serial.print (time/1000000.0, 4);
26  Serial.print ("\t");
27  Serial.println(distance1, 2);
28  delay(20);
29 }
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após esses ajustes, realizamos medidas da queda de objetos, simulando o lendário experimento da Torre de Pisa. Foram feitas medidas de quedas de objetos em relação ao tempo, em uma altura de aproximadamente 1 metro do sensor até o chão, coletados pelo *serial monitor* do Arduino. Para o sensor registrar as posições do objeto, usamos embalagens de papelão (figura 3.15), pois podemos enchê-las para ficarem mais pesadas e assim fazer outras medições com a finalidade de verificar com os estudantes que diferentes pesos produzem a mesma aceleração de queda.

Figura 3.15 - Caixas de papelão utilizadas no experimento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 3.1 mostra os valores encontrados pela queda da embalagem de papelão registrados pelo *serial monitor*. O programa foi escrito para medir distâncias em centímetros e tempos corridos em segundos. Ao iniciar o programa, o Arduino começa a medir distâncias na taxa de 20 ms, sendo assim é adequado filtrar os valores de início e de fim da queda do móvel. Deixamos o corpo bem próximo ao sensor, cerca de 2 cm, e depois o soltamos até atingir o chão. Em seguida, selecionamos os valores da queda pelo *serial monitor* do Arduino.

Tabela 3.1 - Medidas encontradas pelo sensor ultrassônico durante a queda do móvel.

<i>Posição (cm)</i>	<i>Tempo corrido (s)</i>
2,33 ± 0,30	12,9999 ± 0,0002
2,45 ± 0,30	13,0208 ± 0,0002
3,00 ± 0,30	13,0417 ± 0,0002
3,97 ± 0,30	13,0626 ± 0,0002
5,36 ± 0,30	13,0835 ± 0,0002
7,18 ± 0,30	13,1044 ± 0,0002
9,55 ± 0,30	13,1265 ± 0,0002
12,40 ± 0,30	13,1485 ± 0,0002
15,71 ± 0,30	13,1705 ± 0,0002
19,51 ± 0,30	13,1927 ± 0,0002
23,78 ± 0,30	13,2148 ± 0,0002
28,53 ± 0,30	13,2369 ± 0,0002
33,79 ± 0,30	13,2591 ± 0,0002
38,79 ± 0,30	13,2787 ± 0,0002
44,93 ± 0,30	13,3009 ± 0,0002
51,55 ± 0,30	13,3231 ± 0,0002
58,65 ± 0,30	13,3453 ± 0,0002
66,24 ± 0,30	13,3676 ± 0,0002
74,33 ± 0,30	13,3899 ± 0,0002
82,91 ± 0,30	13,4122 ± 0,0002
92,00 ± 0,30	13,4346 ± 0,0002

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o manual do sensor ultrassônico, este possui uma incerteza de tempo de 0,2 ms e de 3,0 mm nas distâncias. Comparamos as distâncias registradas pelo Arduino com uma trena nas distâncias de 2 cm até 10 cm (a cada 1 cm) e 10 cm até 1 metro (a cada 10 cm). Podemos dizer que as medidas de distâncias estão de acordo com a incerteza de 3,0 mm do manual do fabricante.

Galileu, nas *Duas Novas Ciências*, demonstrou geometricamente que no movimento uniformemente acelerado, os espaços percorridos são proporcionais aos quadrados dos tempos percorridos.

De acordo com Vuolo (1996), a incerteza padrão em k é, em primeira aproximação, dado por:

$$S = kt^2 \quad (3.23)$$

$$k = \frac{S}{t^2} \quad (3.24)$$

$$\Delta k^2 = \left(\frac{\partial k}{\partial S}\right)^2 \cdot \Delta S^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial t}\right)^2 \cdot \Delta t^2 \quad (3.25)$$

$$\Delta k = \sqrt{\left(\frac{1}{t^4}\right) \cdot \Delta S^2 + \left(\frac{4S^2}{t^6}\right) \cdot \Delta t^2} \quad (3.26)$$

Galileu repetia diversas vezes as medidas do experimento do plano inclinado para certificar da reprodutibilidade das medidas, como pode ser visto nas *Duas Novas Ciências*:

Por meio de experiências repetidas mais de cem vezes, sempre se encontrava que os espaços percorridos estavam entre si como os quadrados dos tempos e isso em todas as inclinações do plano, ou seja, da canaleta, pela qual se fazia descer a bola (GALILEI, 1988, p. 176, grifo nosso).

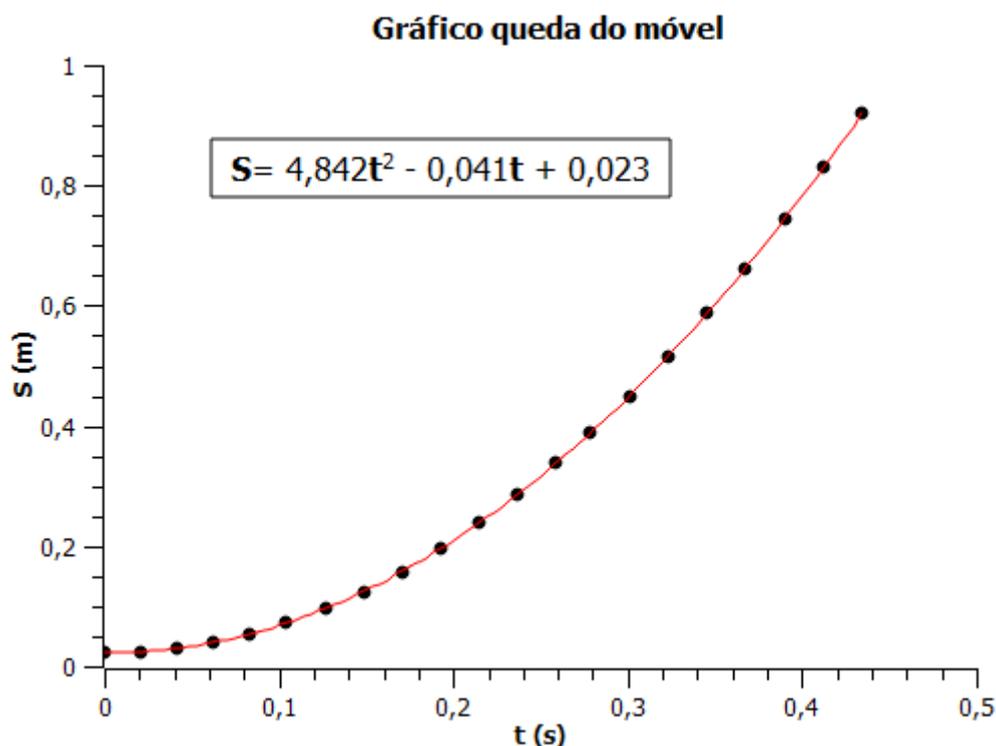
Pela eq. (3.26), consideramos as incertezas para acharmos a constante de proporcionalidade k , como pode ser visto na tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Medidas de posições e intervalos de tempo do móvel registrado pelo sensor ultrassônico.

Posição (m)	Tempo (s)	k (m/s ²)	Δk (m/s ²)
0,023 \pm 0,003	0	-	-
0,025 \pm 0,003	0,0208 \pm 0,0002	56,575	7,012
0,030 \pm 0,003	0,0417 \pm 0,0002	17,277	1,736
0,040 \pm 0,003	0,0626 \pm 0,0002	10,140	0,769
0,054 \pm 0,003	0,0835 \pm 0,0002	7,688	0,432
0,073 \pm 0,003	0,1044 \pm 0,0002	6,582	0,276
0,096 \pm 0,003	0,1265 \pm 0,0002	5,973	0,189
0,124 \pm 0,003	0,1485 \pm 0,0002	5,622	0,137
0,157 \pm 0,003	0,1705 \pm 0,0002	5,402	0,104
0,195 \pm 0,003	0,1927 \pm 0,0002	5,256	0,082
0,238 \pm 0,003	0,2148 \pm 0,0002	5,156	0,066
0,285 \pm 0,003	0,2369 \pm 0,0002	5,083	0,054
0,338 \pm 0,003	0,2591 \pm 0,0002	5,032	0,045
0,388 \pm 0,003	0,2787 \pm 0,0002	4,994	0,039
0,449 \pm 0,003	0,3009 \pm 0,0002	4,963	0,034
0,516 \pm 0,003	0,3231 \pm 0,0002	4,938	0,029
0,587 \pm 0,003	0,3453 \pm 0,0002	4,918	0,026
0,662 \pm 0,003	0,3676 \pm 0,0002	4,902	0,023
0,743 \pm 0,003	0,3899 \pm 0,0002	4,890	0,020
0,829 \pm 0,003	0,4122 \pm 0,0002	4,879	0,018
0,920 \pm 0,003	0,4346 \pm 0,0002	4,871	0,017

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado apresentado na figura 3.16 mostra o cálculo de $k = 4,84 \text{ m/s}^2$ utilizando o programa *Scydavis* disponível gratuitamente pela *internet*:

Figura 3.16 - Curva da queda do objeto em uma altura de um metro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que k corresponde à proporção quadrática afirmada por Galileu nas *Duas Novas Ciências*. O que revela que a queda do objeto se trata de um movimento uniformemente acelerado.

Com o sensor ultrassônico devidamente ajustado, as medições foram satisfatórias. Vale destacar que o aparato experimental ultrassônico de queda vertical é muito prático de se montar, podendo ser montado rapidamente e usado dentro da sala de aula sem necessariamente ter a disponibilidade de um laboratório.

3.5 REFERENCIAL TEÓRICO

Realizamos um trabalho com os alunos utilizando alguns aspectos da atividade experimental juntamente com o contexto sócio-histórico do lendário experimento da Torre de Pisa. De todas as teorias pedagógicas que exploramos, a que mais correspondeu ao nosso trabalho foi a teoria histórico-cultural de Vigotski.

A obra de Vigotski aborda o processo do desenvolvimento infantil relacionando a cultura e as relações sociais no desenvolvimento do psiquismo da criança. O significado do termo “cultura” na perspectiva vigotskiana pode ser entendido, segundo Pino (2000), de forma bem resumida, como a plenitude da produção humana, quer dizer, o domínio em relação à criação e a transformação do homem sobre a natureza.

A cultura origina formas especiais de conduta, modifica a atividade das funções psíquicas, edifica novos níveis no sistema do comportamento humano em desenvolvimento (VIGOTSKI, 1995, p.34).

Para Vigotski (1995), a cultura sobrepõe aos processos biológicos. A formação cultural é parte fundamental da constituição da natureza humana. A origem das funções psicológicas particularmente humanas é cultural e não biológica.

Vigotski utilizou o uso de instrumentos pelo ser humano como ferramenta ao conceito de atividade mediadora. A relação do ser humano com o mundo não é uma relação direta, mas uma relação mediada. O uso de instrumentos é um elemento mediador no desenvolvimento do ser humano.

A importância do uso de instrumentos pela atividade humana encontra alicerce nas ideias marxistas em relação ao trabalho. O homem transforma a natureza pelo trabalho, nessa transformação ocorre à união do homem e da natureza, e dessa relação cria-se a cultura e história humanas. Portanto, o trabalho é responsável pelo desenvolvimento das relações sociais, e a criação, uso e aperfeiçoamento de instrumentos. É no trabalho que o ser humano constrói aquilo que foi previamente estabelecido pela mente humana utilizando as diferentes manifestações da natureza, suas relações e modificações. Nesse processo de trabalho, como é esclarecido por Marx, além dos seres humanos transformarem a natureza, eles também transformam a si mesmos. Essa transformação pode ser entendida como esse exemplo dado por Duarte (2016):

O ser humano não criou a lança para desenvolver suas habilidades e fazer disputas de lançamento de dardos. Mas o uso da lança desenvolveu as habilidades humanas, o que, com o desenrolar histórico-social, acabou tornando-se um fim em si mesmo (DUARTE, 2016, p. 43).

Outra contribuição de Vigotski ao desenvolvimento do pensamento das crianças e dos adolescentes está relacionada aos conceitos científicos e espontâneos. Na obra *Pensamento e Linguagem*, Vigotski (2010) afirmou que a aprendizagem escolar dos conceitos científicos realiza uma significativa transformação nos conceitos espontâneos que a criança e o

adolescente possuem. Ademais, para Vigotski, essas duas classes de conceitos estão ligados na história do aluno.

“O desenvolvimento dos conceitos espontâneos e científicos - cabe pressupor - são processos intimamente interligados, que exercem influências um sobre o outro. [...] independentemente de falarmos do desenvolvimento dos conceitos espontâneos ou científicos, trata-se do desenvolvimento de um processo único de formação de conceitos, que se realiza sob diferentes condições internas e externas mas continua indiviso por sua natureza e não se constitui da luta, do conflito e do antagonismo de duas formas de pensamento que desde o início se excluem” (VIGOTSKI, 2010, p. 261).

Pode-se dizer que há uma relação direta entre o conceito e o objeto quando aplicado aos conceitos espontâneos. Para os conceitos científicos, a relação com o objeto não é direta, é indireta. Os conceitos científicos se relacionam com outros conceitos de um mesmo sistema teórico, exigindo um exercício constante de abstração. Por isso a aprendizagem escolar é de extrema importância para Vigotski, pois ela que possibilita ao estudante o contato com os conceitos científicos.

A aprendizagem não começa só na idade escolar, ela existe também na idade pré-escolar. Uma investigação futura provavelmente mostrará que os conceitos espontâneos da criança são um produto da aprendizagem pré-escolar tanto quanto os conceitos científicos são um produto da aprendizagem escolar (VIGOTSKI, 2009, p. 388).

Para Vigotski (2010), a força dos conceitos científicos significaria a fraqueza dos conceitos espontâneos, e vice-versa, a força dos conceitos espontâneos representaria a fraqueza dos conceitos científicos. Na leitura de Duarte (2016), a força dos conceitos científicos estaria na elevada capacidade de sistematização, generalização e síntese. Já a força dos conceitos espontâneos ficaria na experiência pessoal da criança e do adolescente, em uma relação muito próxima ao objeto, porém formada de um caráter assistemático e limitada devida sua aplicação prática. Os conceitos espontâneos teriam a função de fazer com que a criança e o adolescente adquirissem os conceitos científicos para que seus pensamentos não se mantivessem refém do senso comum das relações cotidianas.

A educação social, que surge na grandiosa época de reconstrução definitiva da humanidade, está chamada a realizar o que sempre sonhou a humanidade como um milagre religioso: que os cegos vejam e os surdos falem. Provavelmente a humanidade vencerá, cedo ou tarde, a cegueira, a surdez, a debilidade mental. Porém a vencerá muito antes no plano social e pedagógico que no plano médico e biológico (VIGOTSKY, 1997, p. 82).

Utilizando outra contribuição, talvez a mais conhecida, criada por Vigotski para compreensão dos processos de aprendizagem certamente é o conceito de zona de desenvolvimento imediato (ZDI), ou próximo.

Afirmamos que em colaboração a criança sempre pode fazer mais do que sozinha. No entanto, cabe acrescentar: não infinitamente mais, porém só em determinados limites, rigorosamente determinados pelo estado do seu desenvolvimento e pelas suas potencialidades intelectuais. Em colaboração, a criança se revela mais forte e mais inteligente que trabalhando sozinha, projeta-se ao nível das dificuldades intelectuais que ela resolve, mas sempre existe uma distância rigorosamente determinada por lei, que condiciona a divergência entre a sua inteligência ocupada no trabalho que ela realiza sozinha e a sua inteligência no trabalho em colaboração. (...) A possibilidade maior ou menor de que a criança passe do que sabe para o que sabe fazer em colaboração é o sintoma mais sensível que caracteriza a dinâmica do desenvolvimento e o êxito da criança. Tal possibilidade coincide perfeitamente com sua zona de desenvolvimento imediato (VIGOTSKI, 2010, p. 329).

Já a ZDI é um estágio de desenvolvimento das funções psíquicas em que as crianças são capazes de adquirir, somente se ajudadas por um educador ou por parceiros mais capazes. Sendo assim, o ensino não pode ficar restrito à zona de desenvolvimento real da criança, mas operar na ZDI, no intuito de provocar “novos processos internos de desenvolvimento” (PASQUALINI, 2010, p. 174).

O último aspecto a ser mencionado sobre a teoria sócio-cultural de Vigotski neste trabalho é a imitação. “A imitação, se concebida em sentido mais amplo, é a forma principal em que se realiza a influência da aprendizagem sobre o desenvolvimento” (VIGOTSKI, 2010, p. 331).

A imitação não pode ser compreendida como uma atividade puramente mecânica. Também vale destacar que a imitação humana é diferente da imitação animal, pois este não possui a capacidade, via imitação, de desenvolver suas faculdades intelectuais e nem é capaz de “assimilar nada de essencialmente novo em comparação com o que já sabe” (VIGOTSKI, 2010, p. 330). A imitação para Vigotski tem outro sentido para o desenvolvimento do intelecto da criança:

A criança só pode imitar o que se encontra na zona das suas próprias potencialidades intelectuais. Assim, se eu não sei jogar xadrez, isto é, se até mesmo o melhor enxadrista me mostrar como ganhar uma partida, eu não vou conseguir fazê-lo. Se eu sei aritmética, mas tenho dificuldade de resolver algum problema complexo, a mostra da solução pode me levar imediatamente à minha própria solução, mas se eu não sei matemática superior a mostra da solução de uma equação diferencial não fará meu próprio pensamento dar um passo nesta direção. Para imitar, é preciso ter alguma possibilidade de passar do que eu sei fazer para o que não sei (VIGOTSKI, 2010, p.328).

Na educação escolar, Vigotski revela que: “a aprendizagem na escola se organiza amplamente com base na imitação. Porque na escola a criança não aprende o que sabe fazer sozinha, mas o que ainda não sabe e lhe vem a ser acessível em colaboração com o professor e sob sua orientação” (VIGOTSKI, 2010, p. 331). Essa enorme relevância que Vigotski deu acerca da imitação como base da aprendizagem escolar, distingue-se consideravelmente das teorias pedagógicas atuais, que descartam o uso da imitação por considerar algo prejudicial ao desenvolvimento da aprendizagem da criança do adolescente.

Capítulo 4

DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E APLICAÇÃO DO PRODUTO

4.1 A ESCOLA E OS ALUNOS

Aplicamos nosso trabalho a estudantes do ensino médio dos 2º e 3º anos da escola pública de Campinas-SP. Esta escola é relativamente nova, terminada a construção em 2004 e iniciada as aulas em 2005. Essa escola possui ensino público integral, do ensino fundamental II e Ensino Médio, sendo no período da manhã as aulas regulares e no período da tarde as aulas extracurriculares como: informática, capoeira, dança, robótica, reforço, entre outras aulas. Não sou professor nessa escola, mas conheço o professor de física e a coordenadora⁵. Ele dava aulas de física nas manhãs e as tardes ensinava robótica a um grupo de alunos. Por coincidência ele tinha um grupo de alunos nas aulas de robótica que estavam montando um carrinho controlado por Arduino, então o nosso trabalho foi aplicado com esses alunos. Nosso

⁵ Esse trabalho não foi aplicado com meus alunos das escolas que leciono, pois nessas escolas em que trabalho não há atividades extracurriculares. Como as quantidades de horas necessárias para realizar esse trabalho foi relativamente alta achamos melhor fazer esse trabalho em escolas de período integral. Devido à alta carga de disciplinas a serem lecionadas nas escolas, não ficaria viável aplicar esse trabalho em aulas normais. Vale lembrar que foi construído apenas um aparato experimental, para aplicar com uma sala inteira seria necessário construir mais.

trabalho foi desenvolvido com 5 alunos presentes em todos os 6 encontros no período da tarde no 2º semestre de 2017.

Na época da aplicação, os laboratórios de física e química estavam em construção. Pelo fato de termos um grupo pequeno, conseguimos aplicar o produto educacional em uma sala de aula equipada com lousa, projetor multimídia e um computador para os alunos, além de nosso *notebook*.

Inicialmente, os alunos estavam com dificuldades em construir um carrinho controlado por controle remoto utilizando o Arduino. Fizemos esse trabalho com eles e depois convencemos a utilizar o Arduino para aprender física. Todos eles aceitaram de prontidão, e a partir daí iniciamos a aplicação do produto.

Cada encontro durava em média duas horas uma vez por semana, sempre respeitando o horário de término das atividades (no máximo às 16h30), pois a região é considerada pelos estudantes e professores muito perigosa para voltar para casa depois das 18h. Como os estudantes tinham alguma familiaridade com o Arduino, então não foi preciso explicar muito os usos dessa plataforma eletrônica e como operá-la. Porém concordamos em relatar que o desconhecimento da plataforma Arduino por parte dos estudantes não é empecilho para fazermos um bom trabalho. O próprio Arduino foi desenvolvido exatamente para pessoas leigas em eletrônica e programação.

4.2 SOBRE AS ATIVIDADES COM OS ESTUDANTES

Como já tínhamos dito, não somos professores da escola pública que aplicamos nosso trabalho. Para aplicá-lo, conversamos primeiramente com a diretora e a coordenadora da escola. Elas apoiaram nosso trabalho e nos encaminharam algumas exigências para trabalhar com os alunos dessa escola. Depois que expusemos o que seria realizado, a diretora indicou alunos do 2º e 3º anos do Ensino Médio, alunos esses que queriam estudar física para realizar o exame do ENEM. Como nosso assunto era essencialmente cinemática, tema recorrente na maioria dos exames de acesso às universidades, a diretoria aprovou nossas atividades com os alunos.

Galileu viveu em um contexto histórico que possibilitou para que ele fosse reconhecido como um dos grandes personagens que mudaram a história da ciência em geral e

da física em particular. É de bom grado que o estudante saiba dos questionamentos científicos de cada época a fim de que eles consigam entender e utilizar as expressões matemáticas envolvidas nos fenômenos físicos. A física de Galileu, assim como a física em geral, é uma construção humana, entretanto, sujeita às transformações da sociedade alicerçada no processo histórico

Fizemos atividades que relacionaram a história da ciência envolvida na lenda do experimento das bolas soltas da Torre de Pisa com atividades de medições de distâncias com o sensor ultrassônico ligado ao Arduino que podem ser vistas no Apêndice A. Todos os instrumentos usados em sala de aula são de meu pertencimento. Os alunos puderam usar o aparato para medir a queda vertical composto por sensor ultrassônico, Arduino, *notebook* de nossa posse e computador da própria escola, juntamente com planilhas eletrônicas.

Nós, professores, já sabemos quase de imediato as dificuldades que os alunos têm em aplicar os conceitos básicos de física ao cotidiano. Para que os alunos vivenciassem essa prática, participamos ativamente no apoio aos alunos em familiarizá-los com os instrumentos envolvidos na prática experimental. Ao percebermos que os alunos tinham mais habilidade em manusear os equipamentos, fomos gradativamente diminuindo nossa interferência na manipulação dos equipamentos e nos atentando mais em outras coisas, como a análise de dados das medições.

Nas atividades envolvendo história da ciência, debatemos com os alunos no intuito de extrairmos suas interpretações acerca do lendário experimento da Torre de Pisa e o experimental mental das duas pedras amarradas proposto por Galileu.

Fizemos um produto educacional composto de um levantamento de ideias prévias e cinco atividades em grupo. Inserimos textos complementares sobre o lendário experimento da Torre de Pisa para que o docente possa enriquecer as atividades. Conciliamos a exigência da diretora de que relacionasse nosso trabalho ao ENEM e inserimos alguns textos nas perguntas, visto que é costume das avaliações do ENEM colocarem muitos trechos interdisciplinares em suas perguntas. Além disso, inserimos também alguns exercícios que trabalharam o conceito de queda livre.

A sequência de aplicação das atividades com os alunos consistiu em trabalhar com o experimento mental que Galileu faz com as duas pedras conjugadas; em seguida retomamos alguns conceitos sobre queda livre; mais tarde utilizamos o sensor ultrassônico para medições de queda dos corpos; e por fim analisamos a lendária história do experimento da Torre de Pisa.

Todo o trabalho aplicado com os alunos foi realizado em seis dias durante seis semanas do segundo semestre de 2017. Os cinco alunos compareceram em todas as atividades. Cada dia de trabalho durou cerca de duas horas. Abaixo está a quantidade de tempo gasta nas atividades.

- 1ª semana (2 horas): levantamento de ideias prévias e atividade 1;
- 2ª semana (2 horas): atividade 2 e 3;
- 3ª semana (2 horas): atividade 3 e 4;
- 4ª e 5ª semanas (4 horas): atividade 4;
- 6ª semana (2 horas): atividade 5.

4.3 SOBRE O LEVANTAMENTO DE IDEIAS PRÉVIAS

O levantamento de ideias prévias foi aplicado no intuito de extrairmos possíveis concepções espontâneas dos estudantes em relação aos conceitos científicos abordados durante as cinco atividades em sala de aula. Fizemos cinco questões que podem ser respondidas em tempo relativamente curto, mas que podem direcionar o andamento do trabalho. Recriamos as demonstrações na sala de aula na medida do possível e discutimos cada questão com os alunos.

Na questão 1, os alunos mostraram que conseguiriam responder satisfatoriamente sem maiores dificuldades. A atenção maior foi o aluno A4, que se confunde um pouco, ao relacionar o peso (aqui o conceito usado de modo informal) do caderno com o peso da folha, mas na mesma resposta coloca o efeito da resistência do ar na queda desses objetos.

Questão 1. *Soltos ao mesmo tempo da mesma altura de 2 metros em uma sala de aula, quem chega primeiramente no chão: uma folha de papel aberta ou um caderno? Justifique sua resposta.*

Resposta do aluno A1:

O caderno. Porque a resistência do ar não atua na folha com a mesma força.

Resposta do aluno A2:

Quem chega primeiro no chão é o caderno, por causa que o caderno não sofre muito pela resistência do ar, já a resistência do ar na folha é bem maior que do caderno.

Resposta do aluno A3:

O CADERNO CHEGA NO CHÃO PRIMEIRO, A FOLHA DEMORA MAIS PARA CAIR POR CAUSA DA INFLUÊNCIA DO AR, SE FOSSE NA LUA OS DOIS CAIRIAM JUNTOS.

Resposta do aluno A4:

O CADERNO chega primeiro ao chão, porque o caderno é mais pesado que a folha de papel e o ar interfere mais na folha do que no do caderno.

Resposta do aluno A5:

O caderno, pois o ar impede o movimento da folha de cair junto com o caderno

Na questão 2, os alunos também responderam de modo satisfatório, mas alguns pontos de correção tem que ser levados em conta. O aluno A2 disse que “o peso deles vence a resistência do ar”, como se a resistência do ar pudesse ser neutralizada pelo corpo durante a queda. Este aluno também utiliza o conceito peso de modo informal. O aluno A5 já consegue estimar que a resistência do ar pode ser considerada como “desprezível” na queda da bolinha de papel.

Questão 2. Soltos ao mesmo tempo da mesma altura de 2 metros em uma sala de aula, quem cai primeiro: uma bolinha de papel ou um caderno? Justifique sua resposta.

Resposta do aluno A1:

Os dois chegam juntos no chão, pois a resistência do ar não interfere na bolinha de papel como interferia na folha.

Resposta do aluno A2:

Jo folha por menor tempo, a bolinha de papel e o caderno chegam juntos na chã, pois o peso dele vence a resistência do ar.

Resposta do aluno A3:

NA FOLHA DE PAPEL TINHA MAIS AR PARA IMPEDIR QUE A FOLHA DEMORASSE PARA CAIR, COM A BOLINHA ISSO JÁ NÃO OCORRE. ENTÃO TANTO A BOLINHA DE PAPEL QUANTO O CADERNO CHEGARIAM JUNTOS.

Resposta do aluno A4:

A bolinha de papel e o caderno chegam juntos porque a bolinha de papel não sofre tanto a interferência do ar por estar menor e ter menos contato com o ar do que a folha aberta.

Resposta do aluno A5:

A bolinha e o caderno caem juntos, porque a resistência do ar é desprezível quando amassamos a folha de papel em formato de bolinha.

Na questão 3, apesar dessa demonstração ser muito simples, muitos alunos e professores desconhecem essa demonstração o que faz com que os alunos tenham dificuldade em raciocinar em demonstrações que eles nunca viram. Como as demonstrações anteriores eles imaginavam os objetos caindo lado a lado, fica difícil eles imaginarem um corpo em cima do outro como é o caso dessa questão. Nenhum dos alunos conseguiu acertar como a folha deveria cair, o aluno A3 até tentou relacionar com alguma demonstração que ele já tivera visto, mas sem sucesso. Então fizemos uma demonstração a eles dessa demonstração, explicando que a folha cai “colada” na parte de cima do caderno, mostrando que a resistência do ar não exerce considerável interferência na folha de papel, esta folha poderia ser considerada como parte integrante do caderno durante a queda.

Questão 3. Imagine você segurando um caderno com uma folha de papel apoiada em cima desse mesmo caderno. Se soltarmos o caderno com a folha em cima, o que acontece com a folha de papel durante a queda em comparação com a queda do caderno?

Resposta do aluno A1:

PARECE QUE A FOLHA VAI SUBIR E O CADERNO VAI DESCER, MAS NÃO TENHO CERTEZA.

Resposta do aluno A2:

O caderno cai e a folha sobe e depois ela tem que cair.

Resposta do aluno A3:

O CADERNO CAI RAPIDAMENTE E A FOLHA PERMANECE QUASE PARADA, COMO AQUELE EXPERIMENTO DA MOEDA EM CIMA DO PAPEL APOIADO NO COPO, QUANDO PUXAMOS O PAPEL COM RAPIDEZ, A MOEDA DEMORA A CAIR.

Resposta do aluno A4:

A folha de papel descola do caderno, o caderno cai rapidamente e a folha demora a cair por causa da resistência do ar.

Resposta do aluno A5:

O caderno cai primeiro, mas no momento da descida há um espaço de ar entre a folha e o caderno que faz com que a folha demore mais a cair.

Na questão 4, apenas os alunos A3 e A5 acertaram a questão, os demais não se atentaram ao fato de que a Lua não possui atmosfera. O aluno A4 relatou que a Lua também tem gravidade assim como na Terra, o que mostra a confusão entre o conceito de peso e de resistência do ar. Para melhor interpretar essa questão com os alunos, utilizamos o vídeo⁶ em que o astronauta Dave Scott, em 1971, reproduz essa demonstração.

Questão 4. Um martelo e uma pena soltos da mesma altura na superfície da Lua, quem você acha que cairá primeiro: o martelo ou a pena? Justifique sua resposta.

Resposta do aluno A1:

O martelo cairá primeiro na Lua

Resposta do aluno A2:

Acredito que o martelo cairá antes da pena, assim como na Terra.

Resposta do aluno A3:

OS DOIS CAEM JUNTOS PORQUE NA LUA NÃO TEM AR PARA INTERFERIR NA QUEDA DA PENA.

Resposta do aluno A4:

A pena vai demorar mais para cair porque na Lua tem gravidade também.

Resposta do aluno A5:

Não há atmosfera na lua, então não há resistência do ar, então o martelo e a pena caem juntos.

⁶ O vídeo da queda do martelo e da pena na Lua foi retirado de <https://www.youtube.com/watch?v=HqcCpwleiu4> acessado em 22 de Novembro de 2018

Na questão 5 boa parte dos alunos acreditam que a velocidade da bola de ferro fica fixa durante a queda. Apesar de a cinemática escalar ser um assunto muito estudado nas salas do Ensino Médio, infelizmente, ainda temos diversas confusões que os alunos fazem com esse fenômeno. Além do fato dos alunos se atrapalharem com as unidades de medidas das grandezas físicas, como pode ser vista na dificuldade em distinguir velocidade de aceleração, os alunos A1 e A2 deram a entender que um objeto em queda permanece com a mesma velocidade durante todo o trajeto. O aluno A4 deixou a questão em branco. O aluno A3 respondeu parcialmente e somente o aluno A5 respondeu satisfatoriamente a questão em análise.

Questão 5. *O valor da aceleração da gravidade na Terra é equivalente a 10 m/s^2 . Se uma bola de ferro for solta de uma torre alta, qual a velocidade dessa bola em 1 segundo? Em 2 segundos? E em 3 segundos? (despreze a resistência do ar).*

Resposta do aluno A1:

A VELOCIDADE DA BOLA É 10 m/s^2 EM TODOS OS SEGUNDOS

Resposta do aluno A2:

A cada segundo a bola de ferro atinge 10 metros por segundo.

Resposta do aluno A3:

A VELOCIDADE DA BOLA SEMPRE FICA COM 10 m/s .

Resposta do aluno A4:

Essa questão estava em branco.

Resposta do aluno A5:

Em 1 segundo dá 10 m/s , em 2 segundos dá 20 m/s e em 3 segundos dá 30 m/s

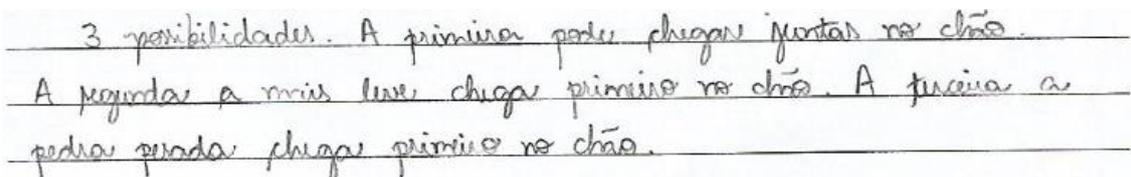
Nota-se que os alunos deram respostas satisfatórias ao questionário sobre os conhecimentos prévios que os alunos tinham sobre a queda de corpos. Após esse trabalho, prosseguimos com a aplicação das demais atividades.

4.4 ATIVIDADE 1: O EXPERIMENTO MENTAL DAS DUAS PEDRAS CONJUGADAS

Nessa atividade que pode ser vista no apêndice A, propusemos aos alunos para que julgassem a interpretação que Aristóteles fez do movimento de queda dos corpos. Sabemos que os alunos ainda tendem a acreditar que objetos mais pesados caem mais rápidos que objetos mais leves, mesmo se desconsiderarmos a resistência do ar. Galileu em seu livro *Dois Novas Ciências*, já questionava esse movimento interpretado por Aristóteles ao ponto de mostrar onde Aristóteles errou utilizando a própria interpretação aristotélica do movimento de queda. Galileu fez isso utilizando o experimento mental das pedras conjugadas.

Para que os alunos pudessem perceber os questionamentos de Galileu acerca do movimento da doutrina aristotélica da queda dos corpos, fizemos um grupo de 5 alunos e pedimos para que respondessem algumas perguntas.

Na primeira pergunta, “*quantas e quais as diferentes possibilidades que essas pedras podem chegar ao chão uma em relação à outra?*”, após uma pequena explanação, o grupo respondeu abaixo, reproduzido sem alterações:



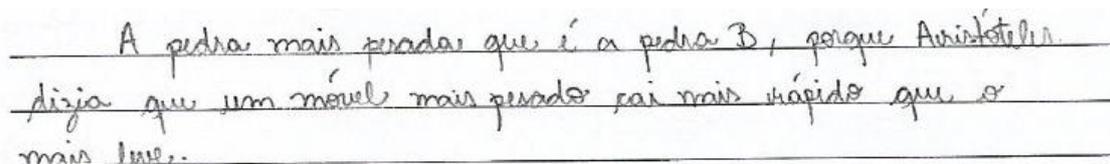
3 possibilidades. A primeira pode chegar juntas no chão.
A segunda a mais leve chega primeiro no chão. A terceira a
pedra pesada chega primeiro no chão.

Por essa resposta, acreditamos que os alunos conseguiram chegar a um bom entendimento, que após eles conversarem entre si, responderam de modo suficiente.

Na segunda pergunta, “*segundo a lógica de Aristóteles, qual pedra chegará primeiramente ao chão? Justifique*”, o grupo de alunos também conseguiu responder bem essa pergunta, pois nessa atividade há um trecho retirado das “*Dois Novas Ciências*” que pode facilitar o entendimento dessa pergunta:

“[Aristóteles] supõe que móveis de pesos diferentes se movem no mesmo meio com velocidades desiguais, as quais mantêm entre si a mesma proporção que os pesos; de modo que, por exemplo, um móvel dez vezes mais pesado que outro, move-se com uma velocidade dez vezes maior”.

A resposta do grupo foi essa:

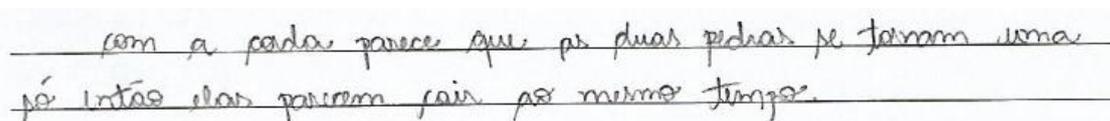


A pedra mais pesada que é a pedra B, porque Aristóteles diz que um móvel mais pesado cai mais rápido que o mais leve.

Reforçamos nessa pergunta que o grupo deveria responder de acordo com a interpretação de Aristóteles e não com o que eles acreditavam. Explicado dessa maneira, os alunos conseguiram entender sem muitos problemas.

Na terceira pergunta: “Agora vamos entender o experimento mental que Galileu fez: suponha que a mesma pedra A, bem mais leve que a B, caia da Torre de Pisa a 4 unidades de velocidade e que a pedra B caia a 8 unidades de velocidade. Utilizando a lógica de Aristóteles, se unirmos as pedras com uma corda, com que velocidade as pedras vão cair? Justifique sua resposta.” O grupo teve dificuldades em responder a esta questão. Realmente ela é mais difícil se comparada às perguntas anteriores, precisou de maior dedicação de nossa parte para que os alunos entendessem o questionamento. Para isso, relembramos as duas perguntas anteriores e pedimos para que o grupo usasse as respostas das duas perguntas. Além disso, fizemos novas perguntas para facilitar a construção das respostas, como: *quando as pedras estão unidas a corda, as duas pedras se tornam um só corpo durante a queda ou não?* Eles titubearam e responderam que “sim”, talvez influenciado por um aluno que relacionou um caminhão composto por uma carreta. Depois fizemos outra pergunta: *como as pedras estão unidas, o corpo mais pesado vai cair primeiro do que o mais leve, fazendo com que a pedra pesada fique abaixo da pedra mais leve durante a queda, então podemos dizer que a pedra leve faz a função de um paraquedas na pedra mais pesada?* E eles responderam também que “sim”.

Após determinado tempo para os alunos raciocinarem nessa pergunta, o grupo respondeu:



com a corda parece que as duas pedras se tornam uma só então elas parecem cair ao mesmo tempo.

A terceira pergunta remete a uma contradição que Galileu extrai da interpretação de Aristóteles, com um simples e belo experimento mental das duas pedras conjugadas. Os alunos ainda não perceberam essa contradição, apesar da resposta não conter nada sobre os graus da velocidade, porém percebe-se que já evoluíram em entender que quando as duas pedras estão unidas, estas podem ser interpretadas como se fosse um corpo só, essa resposta tem sentido, porém está incompleta.

A quarta pergunta tem como objetivo deixar clara a contradição lógica presente na doutrina aristotélica do experimento mental das duas pedras conjugadas. Essa pergunta foi: “*podemos afirmar que há uma contradição lógica em Aristóteles?*”.

Quando os alunos leram essa pergunta, alguns já exclamavam, dizendo, “*Ah, sabia que tinha uma pegadinha do professor aí!*”, dissemos que não tinha nenhuma “pegadinha”, mas poderia ter alguma contradição em interpretar o experimento mental das duas pedras conjugadas de acordo com a afirmação de Aristóteles.

Com as pedras atadas em uma corda, de acordo com Aristóteles, a pedra de maior peso vai cair puxando a mais leve para baixo e tentando fazê-la cair mais rápido do que aconteceria se estivesse desamarrada. Quer dizer, com a de menor peso agindo um pouco, por assim dizer, como um paraquedas, tendendo a retardar a pedra mais pesada. Deste modo, o corpo conjugado deve cair mais rapidamente que a pedra mais leve sozinha, e mais lentamente que a pedra pesada. Mas o corpo conjugado é obviamente mais pesado do que a pedra pesada e, como consequência, deveria cair mais rápido do que a pedra pesada.

Orientamos aos alunos a relacionarem as pedras caindo sem e com a corda para tentarem identificar uma contradição entre as velocidades de quedas das pedras. Interferimos assim: *de acordo com Aristóteles, qual situação a pedra pesada cai mais rapidamente, na situação sem corda ou com corda? E fazendo a mesma situação, mas para a pedra leve, qual situação a pedra leve cairá mais rapidamente?* Ao tentarem responder essas questões, os alunos relataram o “efeito paraquedas” da pedra leve e o “caminhão com carreta” para as pedras conjugada. Após algum tempo, eles verbalizaram praticamente assim: “*a pedra pesada cai mais rapidamente na situação sem a corda, porque na situação com a corda a pedra leve frearia a pedra pesada*”. Sobre a pedra leve, eles responderam que “*na situação com a corda, a pedra leve cairia mais rapidamente, pois a pedra pesada está puxando a leve com mais velocidade*”. Com base nessas respostas então retornamos a quarta pergunta: *podemos afirmar que há uma contradição lógica em Aristóteles?* Eles disseram, depois de retomarmos a terceira pergunta:

Sim, pois as pedras podem cair de uma forma se analisadas uma a uma e de outra forma se as duas pedras se formarem uma pedra já mais pesada.

Pela resposta, percebe-se que os alunos conseguiram perceber a contradição fundamental na lógica de Aristóteles. Segundo a lógica de Aristóteles, a velocidade de queda da pedra maior sozinha será maior que a velocidade de queda das pedras conjugadas, mas estas pedras compostas podem ser um único corpo mais pesado ainda e que terá velocidade menor que a pedra mais pesada se caída sozinha.

4.5 ATIVIDADE 2: DUAS BOLAS CAINDO DO ALTO DA TORRE

Texto Se a “atividade 1” demorou mais tempo, seja pelo início do trabalho com os alunos ou as dificuldades em iniciar as atividades, na “atividade 2” os alunos já se mostraram um pouco mais habilidosos na execução do trabalho.

O objetivo da atividade 2 foi possibilitar que os alunos exercessem raciocínio acerca de experimentos mentais.

Na primeira pergunta, pedimos ao grupo de alunos que destacasse no texto as críticas que Galileu tinha sobre a doutrina aristotélica acerca da queda de duas bolas de ferro. A pergunta foi essa:

“Repare no texto que há uma disputa de narrativa entre qual a teoria do movimento que descreve melhor a queda das duas bolas de ferro, a teoria de Galileu versus a teoria de Aristóteles. Destaque os trechos em que aparecem as críticas de Galileu a teoria de Aristóteles”.

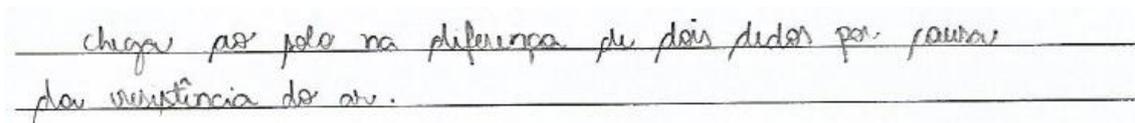
Ao que o grupo destacou:

que uma bola de uma libra tenha descido apenas uma braça***.”, eu afirmo que as duas chegam ao mesmo tempo. Comprova-se, fazendo a experiência, que a maior precede a menor em dois dedos, ou seja, que no momento em que a maior chega ao solo, a outra está a uma distância de dois dedos: ora o senhor quer esconder as noventa e nove braças de Aristóteles sob esses dois dedos e, falando apenas de meu pequeno erro, silenciar sobre a enormidade do outro.

Essa pergunta não oferecia muita dificuldade, pois o trecho destacado das *Duas Novas Ciências*, basicamente todo ele já é uma crítica que Galileu faz do raciocínio de Aristóteles. Os alunos poderiam também citar a parte do texto que relaciona o erro de Galileu que ele diz ser da espessura de um fio de cabelo, enquanto o erro de Aristóteles equivale a uma “amarra de um navio”. Reforçamos essa parte do texto com os alunos para evidenciarmos a importância da verificação experimental que Galileu dá à teoria do movimento.

A segunda pergunta, na verdade, é uma continuação da primeira, sendo assim consideramos que os alunos não obtiveram maiores empecilhos em respondê-la. “Na afirmação de Galileu, por que você acha que as bolas de ferro chegam ao solo a uma diferença de dois dedos?”

Segue a resposta do grupo:

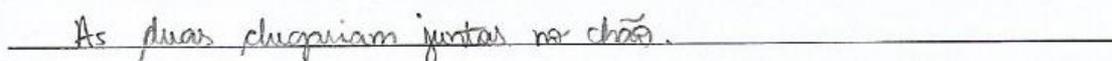


chegar por pelo na diferença de dois dedos por causa da resistência do ar.

A resposta indica que eles entenderam, porém causa dúvida se essa resposta foi algo automático, sem o devido raciocínio. Então retomamos a algumas demonstrações práticas que fizemos no questionário do levantamento de ideias prévias para sensibilizá-los pelo fenômeno em questão. Com uma folha aberta de papel na mão e um livro na outra perguntamos qual dos objetos cairiam antes no chão, o que os alunos prontamente disseram que seria o livro. E se eu amassasse a folha e repetisse o experimento, eles disseram que os dois cairiam juntos. E por final, se eu colocar a folha aberta em cima do livro e deixá-los caírem nessa situação, o que aconteceria com a folha? Nessa última pergunta os alunos não souberam responder quando perguntado no questionário sobre as ideias prévias. Uns disseram que folha iria “voar”, outros que iria “descolar do livro e cair também”, mas nenhum aluno inferiu que a folha cairia juntamente com o livro, como se estivesse “colada” no livro. Como tinha feito essa demonstração, os alunos responderam oralmente que a folha cairia junto com o caderno, pois eles se lembraram dessa demonstração que fizemos com eles.

Na terceira pergunta, “se pudéssemos fazer essa experiência das duas bolas em um local vazio de ar, no chamado “vácuo”, qual bola chegaria primeiramente no chão? E se no lugar das bolas, soltássemos uma bola de boliche e uma pena soltas no vácuo da mesma altura, qual desses dois objetos chegaria primeiro ao chão?”, os alunos puderam entrar em conflito com seus raciocínios de “senso comum”, quer dizer, apesar de terem recebido novos conhecimentos sobre a queda de corpos, sobretudo aos experimentos mentais que Galileu

fazia, nesta pergunta, a tentativa era de que os alunos pudessem colocar em prática o que aprenderam. Quando perguntados sobre as duas bolas de ferro de pesos diferentes em queda no vácuo, os alunos responderam que as duas chegariam juntas no chão. Já sobre a queda da bola de boliche e da pena, os alunos não tiveram a mesma segurança em afirmar que as duas cairiam juntas. A maioria relutava em acreditar que o que aconteceu para as duas bolas de ferro também valeria para a bola de boliche e para a pena, pois não havia ar para impedir a queda desses objetos. Essa relutância dos alunos já era esperada, por causa disso, mostramos o vídeo dessa demonstração⁷. Uma divisão da NASA, a “Space Power Facility” que possui uma câmara de vácuo para simulações de voos espaciais, fez uma demonstração de uma bola de boliche e uma pena caindo juntas em um meio quase sem ar, simulando as regiões espaciais. Após esse vídeo, pedimos para que os alunos respondessem a terceira pergunta:



As duas chegam juntas no chão.

Salientamos aos alunos que eliminando a resistência do ar durante a queda, a bola de boliche e a pena caem com a mesma velocidade durante a queda. Por isso caem juntas.

4.6 ATIVIDADE 3: COMO SE “MOVIMENTA” O MOVIMENTO

Antes dos alunos utilizarem o sensor ultrassônico, achamos melhor fazer uma atividade que mais se aproxima ao cotidiano de sala de aula para assim iniciarmos com as medições no aparato experimental.

Foram cinco questões que abordavam a cinemática básica do Ensino Médio. A primeira questão era um exercício que permitia ao professor discorrer sobre a diferença entre velocidade média e velocidade instantânea. Foi preciso ir à lousa e fazer ilustrações para facilitar o entendimento dos alunos acerca do que estava sendo pedido. A atividade três inicia-se com uma introdução no intuito de mostrar a relevância que Galileu deu ao movimento dos corpos, deixando evidente a “proporção” que Galileu encontrou da aceleração da gravidade, tema esse que trabalhamos com os alunos durante toda essa atividade. Após a introdução, começamos com a questão 1:

⁷ <https://www.youtube.com/watch?v=E43-CfukEgs&t=89s> acessado em 22 de Novembro de 2018

Questão 1) Na rodovia dos Bandeirantes, o limite de velocidade para os automóveis é de 120 km/h e para os caminhões é de 90 km/h.

a) Se um automóvel vai de Campinas para São Paulo com velocidade média de 120 km/h, quer dizer que este automóvel viajou com a velocidade de 120 km/h durante todo o trajeto? Justifique.

É muito difícil viajar com 120 km/h porque o carro muda de velocidade no motor, por exemplo, existem motores que fogem com que os veículos que estiverem mais rápidos, possam diminuir sua velocidade.

b) Pode dizer que a velocidade foi de 120 km/h durante um certo intervalo de tempo? Justifique.

A velocidade pode ser de 120 km/h porque tem uma velocidade no velocímetro, dá para ver uma velocidade num tempo certo, mas não dá para ver uma velocidade a todo tempo porque toda hora o carro está mudando a velocidade.

O essencial da questão 1 era que os alunos percebessem a diferença entre velocidade média e velocidade instantânea, conceitos muito explorados na queda vertical dos corpos. Pelas respostas do grupo de alunos, podemos afirmar que os alunos conseguiram perceber a diferença entre essas velocidades.

Na questão 2 abordamos o conceito de Movimento Uniforme muito difundido nas escolas, mas isso não quer dizer que os alunos tenham certo domínio sobre o assunto. Como não sou professor dos alunos dessa escola, todo o momento nos preocupávamos em recorrer aos assuntos principais que permeiam a teoria da queda dos corpos interpretada para a queda vertical. Nessa questão foi desenhada na lousa uma esfera e as posições como pediam na tabela de acordo com a questão 2.

Questão 2) Galileu definiu o Movimento Uniforme (MU) como:

“Entendo por movimento constante ou uniforme aquele cujos espaços, percorridos por um móvel em tempos iguais quaisquer, são iguais entre si”.

No nosso dia a dia, sabemos que não é prático um móvel permanecer exatamente na mesma velocidade escalar (velocidade constante). Porém a compreensão do conceito de velocidade constante é necessária para entendermos o movimento de queda dos corpos, além de outros tipos de movimentos. Vamos imaginar uma pequena esfera se movimentando em uma superfície bem lisa. O movimento dela é descrito pela tabela abaixo:

Posição S (m)	Tempo t(s)
10	0
20	1
30	2
40	3
50	4

a) no tempo de $t = 0$ significa dizer que a esfera percorreu 10 m? Justifique.

ela não percorreu 10 metros, a posição dela, que é 10 metros.

b) qual o valor da velocidade escalar média da esfera em todo o trajeto?

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{50 - 10}{4 - 0} = 10 \text{ m/s}$$

c) o movimento dessa esfera é um movimento uniforme (M.U.)?

Sim, porque a cada segundo a esfera percorre dez metros igualmente.

Antes dos alunos responderem a questão 2, reescrevemos a tabela na lousa e desenhamos uma esfera se movimentando ao longo de um trajeto. Em seguida, fizemos uma analogia do movimento dessa esfera com um automóvel que percorre uma rodovia e passa por aquelas placas azuis que mostram o “km” da rodovia, para citar um exemplo, somente depois dessas explicações que os alunos responderam a questão 2.

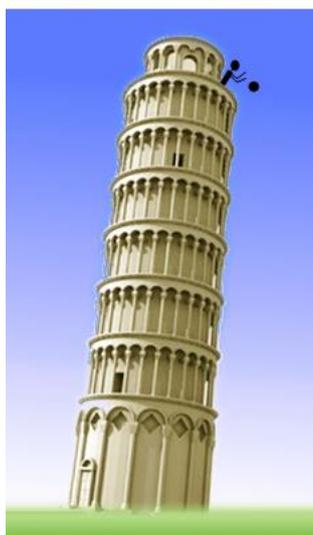
A questão 3 já simula a distância percorrida e a velocidade de queda da bolinha do alto da Torre de Pisa, uma maneira de relacionar os mais fundamentais conceitos da cinemática

com a queda livre. Foi fornecida uma tabela, com lacunas a preencher, representando o tempo e a velocidade de queda da bolinha.

Questão 3) *Preste atenção na definição de Movimento Uniformemente Acelerado (MUA) feita por Galileu:*

“chamamos movimento igualmente, ou seja, uniformemente acelerado, aquele que, partindo do repouso, adquire em tempos iguais momentos (acrécimos) iguais de velocidade”.

Vamos compreender o MUA. Imagine que uma bola de ferro, parecida com uma bola de canhão, seja solta do alto de uma torre e que a velocidade escalar da esfera varie em função do tempo de acordo com os valores da tabela abaixo:



Tempo t(s)	Velocidade v(m/s)
0	0
1	10
2	20
3	30
4	40
5	
6	
7	

a) Vocês conseguem prever quais os valores das velocidades nos espaços em branco da tabela acima?

Tempo t(s)	Velocidade v(m/s)
0	0
1	10
2	20
3	30
4	40
5	50
6	60
7	70

b) Ainda em relação à tabela acima, quão rapidamente (velocidade) cai essa bola de ferro por segundo? Qual é a proporção (a divisão) da velocidade em relação ao tempo?

A velocidade é 10 m/s. A divisão vai dar sempre 10.

c) Assim como a velocidade escalar da queda da esfera varia com o tempo, a sua distância em relação ao chão também varia, como na tabela abaixo. Supondo que $g = 10 \text{ m/s}^2$, complete a tabela abaixo, utilizando a equação abaixo:

$$S = \frac{gt^2}{2}$$

Tempo t(s)	Distância percorrida S(m)
0	0
1	5
2	20
3	45
4	80
5	125
6	180
7	245

d) Se a velocidade em $t = 1 \text{ s}$ era de 10 m/s na primeira tabela, porque a distância percorrida nesse mesmo intervalo de tempo foi de 5 m e não de 10 m ?

A bola não cai com velocidade de 10 m/s em todo o tempo, ela começa com velocidade zero e vai aumentando a velocidade até atingir 10 m/s.

$$v = \frac{5-0}{1-0} = 5 \text{ m/s}$$

e) Vamos encontrar uma das mais famosas contribuições de Galileu ao movimento de queda dos corpos, discutidas no livro *Discursos*. Galileu disse:

“Se um móvel, partindo do repouso, cai com um movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados desses mesmos tempos”.

Em notação atual Galileu quis dizer que $S \propto t^2$ (distância é proporcional ao tempo ao quadrado). Com a tabela anterior, vamos tentar achar essa proporção.

A proporção é igual a 5.

Na questão 3a pedimos aos alunos para preverem os valores de velocidade da queda de acordo com os valores já fornecidos. Eles responderam corretamente, sem mais dificuldades, colocando os valores, “50, 60, 70”, em suas respectivas lacunas.

Na questão 3b, pediu-se para calcular a velocidade de queda em cada segundo, como eles já estavam familiarizados com a equação de velocidade média, responderam essa questão sem mais problemas. Aproveitamos essa questão para discutirmos um pouco do significado da aceleração, pois a partir da tabela seria possível relacionar com o significado de aceleração. Para calcular a aceleração é necessário analisar o quanto a velocidade muda (varia) no tempo. Perguntamos aos alunos se essa “mudança” de velocidade se alterava ao longo da queda da bola de ferro. Ao que eles responderam que sim, pois na questão 3a fica evidente a mudança de velocidade. Sobre a aceleração (perguntado como a proporção-divisão) os alunos não sabiam quais pontos retirar da tabela para fazerem os cálculos, então orientamos para fazer a divisão de ponto a ponto, pois assim eles conseguiram calcular já o valor da aceleração da gravidade de 10 m/s^2 e ainda discutimos que esse valor não muda durante todo o trajeto.

A questão 3c evidencia uma maneira para que os alunos se familiarizassem com a equação da distância do MUV. Por isso, utilizamos uma tabela e o raciocínio semelhante ao da questão 3a para resolvê-la. Na questão 3c os alunos utilizaram a calculadora para preencher as lacunas da tabela da distância percorrida pelo tempo. Responderam satisfatoriamente, como “125, 180, 245”. Salientamos que o resultado está correto quando utilizado a equação da

distância do MUV, porém foi observado que a altura da Torre de Pisa é de cerca de 60 metros, mostrando a previsibilidade que a equação tem para todos outros valores quando se desconsidera a resistência do ar.

A questão 3d é um exemplo clássico para reforçar com os alunos os conceitos de velocidade média e velocidade instantânea. Pedimos aos alunos que observassem na tabela da questão 3c que a bola de ferro cai por uma distância de apenas 5 metros durante o primeiro segundo de queda, muito embora sua velocidade seja então de 10 m/s (pela tabela da questão 3a). Para incentivá-los a responder a questão 3d, perguntamos sobre a velocidade da bola de ferro ser de 10 m/s, se essa velocidade era a velocidade média ou velocidade instantânea da bola? Aos que os alunos verbalizaram como sendo “a velocidade instantânea”. Em seguida, questionamos se a bola inicia a queda com a velocidade de 10 m/s? E quando a bola atinge a velocidade de 10 m/s? Os alunos souberam responder oralmente essas duas perguntas. Depois dessa explicação, pedimos aos alunos que voltassem na pergunta e tentassem respondê-la. Ao que o grupo respondeu satisfatoriamente. Os alunos perceberam a diferença entre velocidade média e velocidade instantânea. Também observaram que a bola cai com velocidade zero, quer dizer, do repouso. Para aproveitar a resposta que eles trouxeram, pedimos para que eles calculassem a velocidade média da bola de zero a 1 s, de acordo com a tabela da questão 3c, no esforço de melhorar a interpretação dos alunos em relação a queda vertical, que felizmente os alunos conseguiram calcular.

Aproveitamos para explicar que quando um corpo parte do repouso em um M.U.V. pode-se calcular a velocidade média desse corpo pela média aritmética da velocidade inicial e final no intervalo de zero a 1 s. Escrevemos na lousa, dessa maneira:

$$v_m = \frac{v_{inicial} + v_{final}}{2} = 5 \text{ m/s}$$
$$v_m = \frac{0 + 10}{2} = 5 \text{ m/s}$$

Esse teorema, na verdade, é o teorema I do livro “*Dois Novas Ciências*”:

O tempo no qual um determinado espaço é percorrido por um móvel que parte do repouso com um movimento uniformemente acelerado é igual ao tempo no qual aquele mesmo espaço seria percorrido pelo mesmo móvel uniforme, cujo grau de velocidade seja a metade do maior e último grau de velocidade alcançado no movimento uniformemente acelerado (GALILEI, 1988, p. 170).

Na questão 3e, após algum tempo disponibilizado aos alunos para que discutissem entre eles o que estava sendo proposto, perguntamos como o grupo iniciaria essa questão. Eles responderam oralmente que é necessário “*mudar o tempo para o tempo ao quadrado*”, então nesse caso fizemos essa questão em conjunto, reescrevemos na lousa o tempo com os quadrados dos tempos dessa maneira:

Tempo t(s)	Tempo t ² (s ²)	Distância percorrida S(m)
0	0	0
1	1	5
2	4	20
3	9	45
4	16	80
5	25	125
6	36	180
7	49	245

Depois dessa tabela os alunos resolveram a equação S/ t^2 para todos os valores para achar a proporção igual a 5. Explicamos para os alunos que Galileu achou a proporção, mas não conseguiu achar o valor mais aceito da aceleração.

Apesar da essência da atividade 3 ser muito comum nas aplicações em sala de aula, isso não quer dizer que os alunos conseguem absorver tal conteúdo. Por isso, nos preocupamos em verificar se os alunos conseguiram ter certa habilidade com os fenômenos abordados nessa atividade. O que foi satisfatoriamente observado nas respostas dadas pelo grupo durante essa atividade.

4.7 ATIVIDADE 4: UTILIZANDO O SENSOR ULTRASSÔNICO

Galileu fez a teoria de queda dos corpos e utilizou os instrumentos de medida juntamente com o experimento para comprovar a teoria e afastar toda e qualquer especulação teórica que não possa ser comprovada. Esse modo ativo de analisar os fenômenos naturais conferiu a Galileu ser conhecido como o primeiro físico no sentido moderno.

A atividade 4 consiste principalmente em utilizar o aparato experimental para reproduzir em escala o lendário experimento da Torre de Pisa. São três tipos de medições com o sensor de ultrassom: teste do sensor comparando a altura com uma trena; queda com objetos de diferentes pesos; e queda de um pratinho de isopor. As respostas dessa atividade foram feitas pelos alunos tanto em papel quanto em planilhas eletrônicas.

A atividade 4 possui seis itens em que os quatro primeiros itens são situações de trabalho que foram utilizados como uma atividade de cunho mais investigativo. Já os dois últimos itens seguem a mesma lógica das atividades anteriores, compostas de perguntas e respostas.

A questão-cenário 4a tem como objetivo fazer com que os alunos entendam como se testa o sensor ultrassônico antes de usá-lo no experimento. Essa questão remete à preocupação que Galileu tinha em se refinar cada vez mais os instrumentos de medida para melhor extrair dados dos experimentos. A questão-cenário 4a é a seguinte:

Questão-cenário 4a: *“Vamos testar o sensor para verificarmos se está medindo de modo satisfatório”.*

Nessa questão-cenário 4a, propusemos aos alunos fazer medidas com o sensor ultrassônico e compará-lo com uma trena disponível para uso. O sensor ultrassônico tem que ficar virado para o chão. Com a trena, os alunos mediram do sensor até o chão e obtiveram uma distância de $(113,0 \pm 0,1)$ cm. Com o sensor ultrassônico, o resultado foi de $(112,9 \pm 0,3)$ cm. Como os resultados são muito semelhantes, discutimos com os alunos se o sensor mede satisfatoriamente se comparado com a trena. Ressaltamos que o erro instrumental da trena de 0,1 cm corresponde a menor divisão da trena, a menor distância entre os “tracinhos” da trena. Já o erro instrumental do sensor de 0,3 cm foi retirado do manual (*datasheet*) do fabricante.

Os alunos retiravam as medidas do *Serial Monitor* do Arduino e inseriam em planilhas eletrônicas para utilizar a média das medidas das distâncias. Não se observou grandes dificuldades nessa questão, uma vez posto o modo que o sensor ultrassônico funcionava.

A questão-cenário 4b pedia o seguinte:

Questão-cenário 4b: *“Como vocês já sabem, Galileu afirmou que duas bolas de ferro de diferentes pesos, soltas da mesma altura, chegam ao mesmo tempo no chão. Vamos preparar o sensor ultrassônico e os outros equipamentos dispostos na mesa para fazer*

medições e comprovar a teoria da queda dos corpos de Galileu de que corpos de diferentes pesos chegam ao mesmo tempo no chão”.

Nessa questão explicamos aos alunos que o sensor ultrassônico não consegue fazer boas medidas em distâncias de zero a 20 cm, então os dados para registro teriam que ser obtidos com uma altura a partir de 20 cm afastados do sensor. Foram usados duas caixas de papelão de diferentes tamanhos: a menor de dimensões de 13,0 cm de comprimento por 7,5 cm de altura e 9,5 cm de profundidade com (233 ± 1) g; e a maior de 23,0 cm de comprimento por 7,5 cm de altura e 15,0 cm de profundidade com (581 ± 1) g. As dimensões das caixas de papelão foram medidas com uma régua comum de 30 cm e a massa delas com uma balança digital mais usada em cozinhas da marca SF-400.

Pedimos a eles para que utilizassem essas duas caixas separadamente e que medissem os tempos e as distâncias percorridas por essas caixas durante a queda. Após verificar os dados do *Serial Monitor* do Arduino, eles tiveram de colocar os valores iniciais e finais da queda das duas caixas, como pode ser visto na tabela abaixo.

Medidas caixa menor	t (s)	S (cm)
Inicial	20,863	20,47
Final	21,271	102,67
Final - Inicial	0,408	82,20

Medidas caixa maior	t (s)	S (cm)
Inicial	33,013	20,15
Final	33,423	103,38
Final - Inicial	0,410	83,23

Em seguida, perguntamos a eles se essas duas caixas chegam ao mesmo tempo no chão. Ao que o grupo respondeu:

As caixas chegam juntas no chão porque o tempo da queda foi bem parecido.

Deixamos no programa uma precisão de seis casas decimais tanto para a distância percorrida quanto para o tempo de queda dos objetos, mas na planilha eletrônica resolvemos diminuir as casas decimais para facilitar a notação dos alunos. Reforçamos que pela teoria do

movimento de Aristóteles a caixa mais pesada deveria cair cerca de 2,5 vezes mais rapidamente que a caixa mais leve por causa da diferença de peso entre elas, fato que não ocorreu. Com esses resultados medidos, comparamos qual seria o tempo de queda utilizando a equação $S = gt^2/2$ com $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ para uma altura de 82,2 cm e 83,23 cm. Para a caixa menor o tempo foi de 0,410 s e para a caixa maior o tempo foi de 0,412 s. Discutimos esses tempos com os alunos, enfatizando que praticamente os resultados se coincidem, mostrando conformidade com as previsões de Galileu.

A questão-cenário 4c teve como objetivo trabalhar a famosa proporção que Galileu explicou em seu livro *Duas Novas Ciências* com os alunos. A questão-cenário 4c foi:

Questão-cenário 4c: *“Vamos confirmar, utilizando a experiência, a mais famosa lei matemática da queda dos corpos feita por Galileu apresentada pelo teorema:*

‘Se um móvel, partindo do repouso, cai com um movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados dos tempos’.

Galileu prova a proporcionalidade entre o espaço percorrido e o quadrado dos tempos pela matemática e comprova essa proporcionalidade com experimento do plano inclinado e não com a queda vertical.

‘Portanto, o que foi demonstrado no referente às quedas verticais, também acontece do mesmo modo para os movimentos que se realizam em planos inclinados quaisquer’.

Como nosso experimento foi feito para estudarmos a queda vertical, vamos chegar nessa proporção realizada por Galileu”.

O programa, ao ser acionado, mostra duas tabelas na *Serial Monitor* do Arduino, uma de tempo e outra de distância no decorrer da queda do objeto. Os alunos escolheram a caixa menor para fazer as medições. Respeitando a distância de 20 cm abaixo do sensor, os alunos soltaram o objeto e colheram esses dados, após todas nossas orientações:

Tempo corrido (s)	Posição percorrida (cm)
16,824060	22,83603
16,846023	23,04759
16,867979	23,72986
16,889991	24,88636
16,912063	26,52106
16,934143	28,6323
16,956239	31,22161
16,978399	34,29722
17,000568	37,85385
17,022764	41,89557
17,044984	46,42349
17,067276	51,45051
17,089500	56,94519
17,111820	62,94900
17,134120	69,43321
17,157499	76,75253
17,181035	84,66009
17,204563	93,10556
17,228098	102,0943

Como o programa do Arduino faz uma medida a cada 20 ms repetidamente, existem medidas que não correspondem ao objeto em queda, sendo dispensado esses valores na construção da tabela acima. Nessa tabela feita pelo grupo, foram retirados os valores de tempo e posição que os alunos deixam a caixa parada abaixo do sensor esperando o momento de soltar a caixa. Também retiramos os valores quando a caixa chega ao chão. Como o programa registra o tempo corrido e a posição percorrida foi preciso ajustar os valores dessa tabela colocando $t_0 = 0$ para a primeira medida registrada no valor de 16,824060 s e $S_0 = 0$ para o valor de 22,83603 cm.

A partir desses valores, ensinamos os alunos a ajustarem os dados para facilitar na obtenção da proporção quadrática do tempo em relação à distância. Segue a tabela abaixo:

Tempo ajustado (s)	Posição medida ajustada (metros)	Posição esperada (metros)
0	0	0
0,021963	0,002116	0,002364
0,043919	0,008938	0,009452
0,065931	0,020503	0,0213
0,088003	0,03685	0,037948
0,110083	0,057963	0,05938
0,132179	0,083856	0,085609
0,154339	0,114612	0,116721
0,176508	0,150178	0,15266
0,198704	0,190595	0,193468
0,220924	0,235875	0,239156
0,243216	0,286145	0,289855
0,265440	0,341092	0,345246
0,287760	0,40113	0,405749
0,310060	0,465972	0,471072
0,333439	0,539165	0,54479
0,356975	0,618241	0,624413
0,380503	0,702695	0,709434
0,404038	0,792583	0,799909

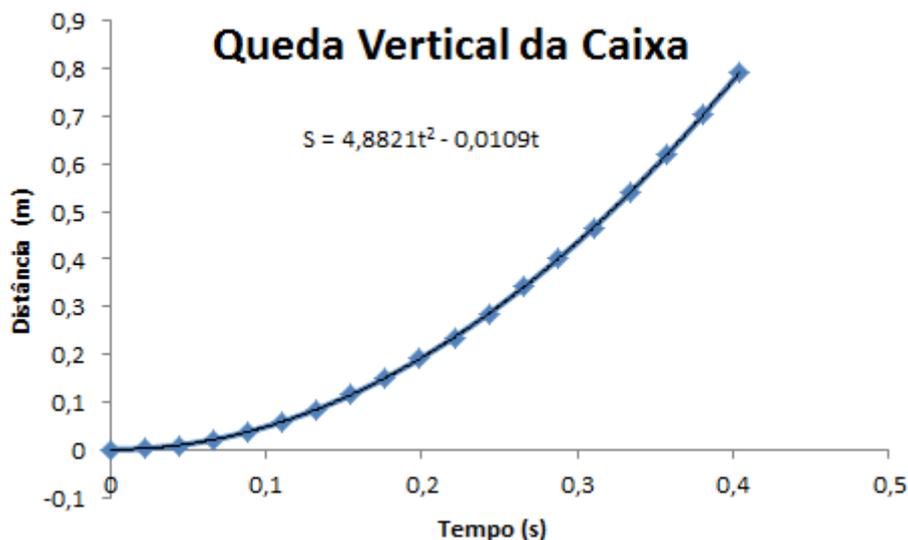
Os tempos e as distâncias medidas pelo sensor foram iniciados com zero para forçarmos em $t_0 = 0$ e $S_0 = 0$. Na terceira coluna foi usada a equação $S = 4,9 t^2$. Em seguida os alunos calcularam a proporção quadrática pelos dados coletados e pela equação já mencionada.

Proporção obtida pelas medidas (m/s ²)	Proporção k = S/t ² (m/s ²)
-	-
4,38579	4,9
4,633911	4,9
4,716773	4,9
4,758239	4,9
4,783083	4,9
4,799635	4,9
4,811476	4,9
4,820346	4,9
4,827244	4,9
4,832762	4,9
4,837284	4,9
4,841036	4,9
4,844221	4,9
4,846945	4,9
4,84941	4,9
4,851566	4,9
4,853454	4,9
4,855122	4,9

A maioria das medidas se aproxima do valor esperado de $k = 4,9$, o que confirma a proporção quadrática dos tempos de Galileu. Os alunos também calcularam a média das proporções, ficando em 4,8.

A média da proporção foi de 4,8.

Para finalizar essa questão, os alunos produziram o gráfico e calcularam o valor da aceleração da gravidade:



A equação respeita a função horária dos espaços do M.U.V. A partir da equação obtida pelo gráfico os alunos calcularam o valor da aceleração da gravidade:

$$S = S_0 + V_0 \cdot t + \frac{g}{2} \cdot t^2$$

$$S = 4,8821t^2 - 0,0109t$$

Handwritten calculations showing the derivation of g from the coefficient of t^2 in the equation:

$$\frac{g}{2} = 4,8821$$

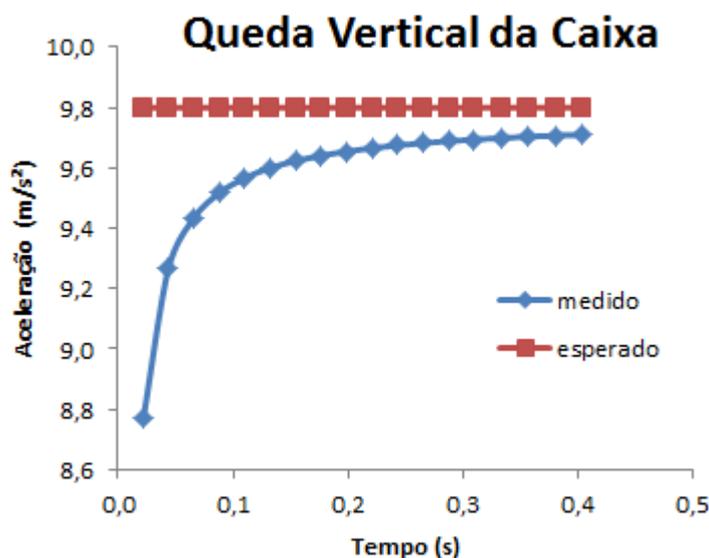
$$g = 9,7642$$

$$g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$$

Comentamos que o valor de $g = 9,7642 \text{ m/s}^2$ é realmente muito próximo do valor utilizado para a aceleração de gravidade. Enfatizamos ainda que em cada região do planeta o valor da aceleração da gravidade não é exatamente o mesmo, o valor da gravidade para a região de Campinas⁸ é de $g = 9,785637690 \text{ m/s}^2$, o que deixa o valor encontrado pelos alunos mais próximo da realidade.

Para finalizar a questão-cenário 4b, os alunos fizeram um gráfico de aceleração pelo tempo para ficar evidente que a aceleração medida se analisada ponto a ponto não corresponde ao valor esperado de cerca de $9,8 \text{ m/s}^2$. Então o grupo fez o gráfico abaixo.

⁸ Valor da aceleração da gravidade obtido pelo endereço: http://agrav.bkg.bund.de/dbadmin/dbm_detail.php?child=1&id=2072&table=vwObs_meta&filter=722&ffield=fkStatID acessado em 22 de Novembro de 2018



Solicitamos que os alunos levantassem hipóteses para tentar responder os motivos pelos quais nossas medidas não correspondem exatamente ao valor mais aceito da aceleração da gravidade (g). *Por que as medidas de aceleração no início da queda estão mais “fora” do que as medidas de g no final da queda?* Ao que o grupo deu várias respostas, sobretudo, disseram algo sobre “*por causa da resistência do ar*” que é a resposta mais comum, mas também disseram que “*no início da queda o tempo entre os pontos é menor, podendo o sensor ter dificuldades em registrar o início da queda*”. Na realidade, o tempo é igual para todas as medidas, como no nosso caso, o programa mede em um intervalo de 20 ms, mas a variação da distância medida no começo da queda que é menor se comparada ao final da queda, visto pela relação dos números ímpares. Depois de corrigidas essas inferências dos alunos, pudemos analisar nessas respostas orais que os alunos conseguiram levantar as interferências tanto científicas, como a resistência do ar, mas também técnicas, como a capacidade do sensor em registrar medidas mais rápidas entre os pontos de queda.

Enfatizamos que Galileu não achou a relação quadrática utilizando a queda vertical como fizemos nesse trabalho, devido à dificuldade de extrair medidas de um objeto em queda vertical. Galileu utilizou o plano inclinado na sua teoria das quedas dos corpos. A sofisticação de Galileu em utilizar o plano inclinado foi demonstrar que um objeto descendo um plano inclinado também poderia ser considerado como uma queda, uma queda mais “suave”, mas que teria a mesma proporção quadrática se usada para a queda vertical.

Também reforçamos que Galileu nunca chegou a calcular o valor da aceleração da gravidade nos valores aceitos atualmente. Na obra *Diálogos sobre os dois máximos sistemas*

do mundo, Galileu estimou que um corpo em queda a partir do repouso que descesse nos primeiros cinco segundos cerca de cem braças, aproximadamente 58 m (GALILEI, 2001, p. 305), resultaria em uma aceleração de $4,6 \text{ m/s}^2$ (portanto, menos da metade do valor correto). A primeira medida precisa da aceleração gravitacional foi realizada 17 anos após a morte de Galileu, em 1659 por Huygens, que encontrou cerca de $9,5 \text{ m/s}^2$ (SILVEIRA, 1995).

Aos poucos os alunos foram adquirindo mais habilidade em manusear o aparato técnico e mais familiaridade com as planilhas eletrônicas na hora de retirar os dados lidos pelo Arduino.

A questão-cenário 4d segue praticamente o mesmo procedimento da questão anterior, só que dessa vez utilizando objetos que oferecem considerável resistência ao cair, como é o caso do pratinho de isopor.

Questão-cenário 4d: *“Vamos analisar o movimento de queda do pratinho de isopor. Faça o mesmo procedimento do item anterior, mas agora utilizando o pratinho de isopor. Esse pratinho cai em movimento uniformemente acelerado? Justifique.”*

O pratinho de isopor usado tinha as dimensões de 21 cm de comprimento por 2 cm de altura e 14 cm de profundidade com peso de 5 g.

Tempo corrido (s)	Posição percorrida (cm)	Tempo ajustado (s)	Posição ajustada (metros)
18,699394	22,20925	0	0
18,723052	25,49449	0,029112	0,032852
18,746864	28,47528	0,052924	0,06266
18,770828	31,47509	0,076888	0,092658
18,794944	34,49393	0,101004	0,122847
18,819206	37,53105	0,125266	0,153218
18,843650	40,59095	0,149710	0,183817
18,868225	43,66725	0,174285	0,21458
18,892974	46,76533	0,199034	0,245561
18,917938	49,89032	0,223998	0,276811
18,943054	53,03434	0,249114	0,308251
18,968383	56,20502	0,274443	0,339958
18,993904	59,39974	0,299964	0,371905
19,019592	62,61537	0,325652	0,404061
19,045455	65,8529	0,351515	0,436436
19,071510	69,11446	0,377570	0,469052
19,097778	72,40269	0,403838	0,501934
19,124267	75,71858	0,430327	0,535093
19,151008	79,06602	0,457068	0,568568
19,177917	82,43449	0,483977	0,602252
19,205101	85,83738	0,511161	0,636281
19,232475	89,26406	0,538535	0,670548
19,260055	92,71653	0,566115	0,705073
19,287841	96,19478	0,593901	0,739855
19,315887	99,70558	0,621947	0,774963

Depois de feita essa tabela, os alunos deveriam concluir se a queda do pratinho de isopor poderia ser caracterizada como movimento uniformemente acelerado. Ao que grupo respondeu oralmente, “*não pode ser, pois ele cai mais devagar que a caixa*”, ou “*não é movimento acelerado porque tem a influência da resistência do ar*”. Pedimos para registrar qualquer uma das respostas que eles deram:

Não pode ser, pois ele caiu mais devagar que a caixa.

Em se tratando do movimento de queda livre, fica razoavelmente fácil para os alunos perceberem que a queda do pratinho de isopor não se caracteriza como M.U.V., porém é de bom grado salientar que a resposta do grupo é restrita ao movimento de queda livre, pois um corpo se movimentando na horizontal, por exemplo, pode ser descrito como M.U.V., mesmo se deslocando com uma velocidade “mais devagar” do que a queda livre. Pensando nisso, pedimos aos alunos voltarem no começo da questão-cenário 4c e procurar qual a definição que Galileu dá ao M.U.V. Ao que o grupo verificou:

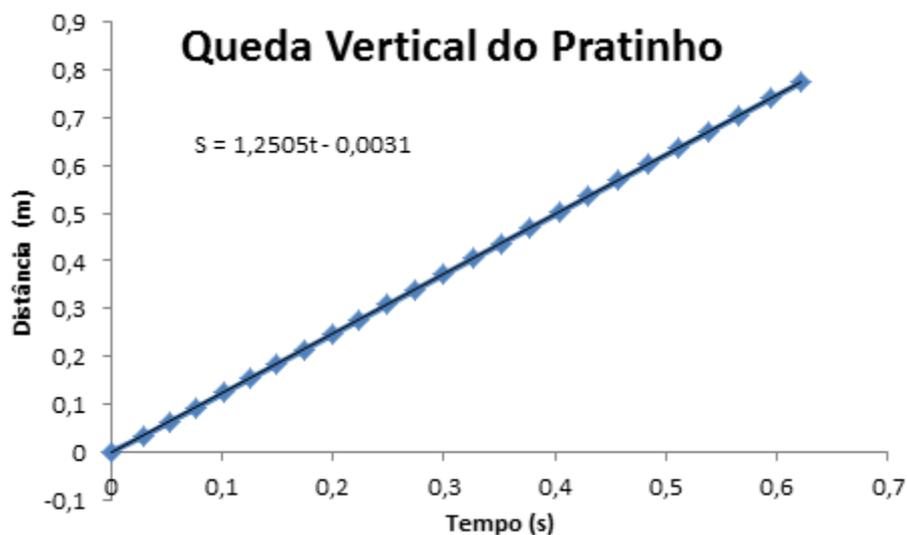
“Se um móvel, partindo do repouso, cai com um movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados dos tempos”.

Eles perceberam que tinham que achar a proporção do quadrado dos tempos com os espaços percorridos, algo semelhante que fizemos no item anterior. Perguntamos qual o valor esperado da proporção, no que eles disseram 4,9. A partir disso eles fizeram uma nova planilha:

$k = S/t^2$ para o pratinho de isopor (m/s^2)
-
38,763505
22,371077
15,673560
12,041670
9,764349
8,201325
7,064300
6,198754
5,516893
4,967159
4,513575
4,133269
3,810128

3,532103
3,290229
3,077745
2,889564
2,721577
2,571160
2,435195
2,312076
2,200010
2,097581
2,003431

Os alunos notaram que esses valores não respeitam a proporção quadrática, então puderam verificar matematicamente que a queda do pratinho não é um M.U.V. Para reforçarmos que não se trata de um M.U.V. os alunos fizeram um gráfico para checarem que o gráfico não produz uma parábola.



Como os alunos puderam perceber que a queda do pratinho não corresponde ao M.U.V. pedimos que fizessem essa outra proporção: $k = S/t$.

$k = S/t$ para o pratinho de isopor (m/s)
-
1,128483
1,183967
1,205109
1,216257
1,223141
1,22782
1,231202
1,233763
1,235773
1,237389
1,238719
1,239832
1,240776
1,241587
1,242292
1,24291
1,243458
1,243946
1,244382
1,244777
1,245134
1,245459
1,245755
1,246028

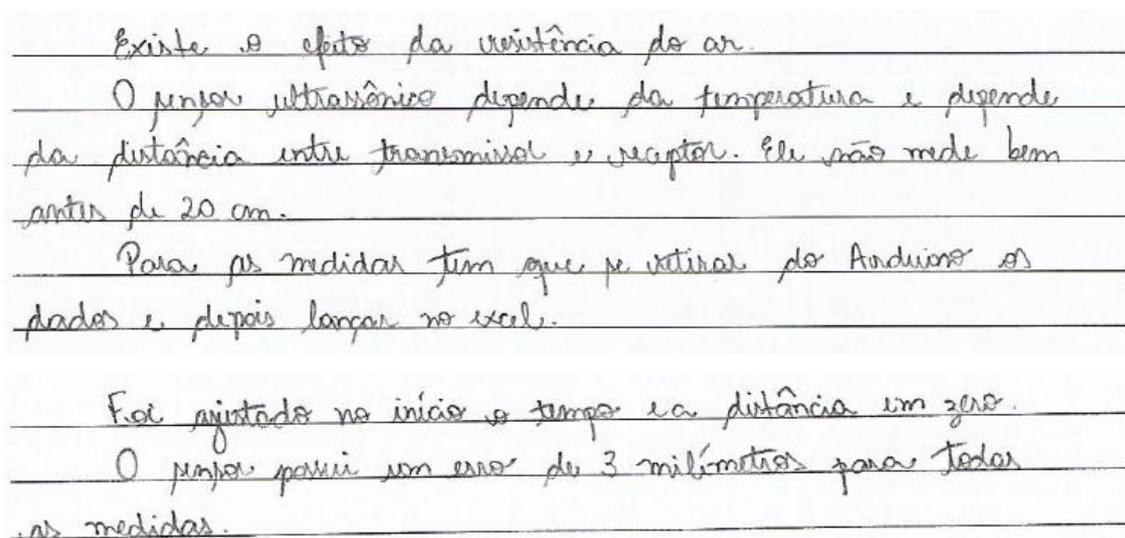
A partir do gráfico e da tabela $k = S/t$ para o pratinho de isopor lançamos aos alunos se eles concordariam em afirmar que esse valor de k poderia ser considerado uma proporção. Os alunos concordaram em existir uma proporção. Em seguida, questionamos os alunos para que eles descobrissem o significado físico desse valor de k . Os alunos conseguiram afirmar que o valor de k (em $k = S/t$) corresponde à velocidade escalar do pratinho.

A questão 4e tem como objetivo despertar os alunos para que pudessem entender que os instrumentos de medidas como no nosso caso, o sensor ultrassônico, tem que ser ajustado para que possamos fazer as medidas de acordo com a teoria que estamos analisando. A questão foi dessa forma:

Questão 4e: “Utilizamos instrumentos de tecnologia avançada, de certo modo. Galileu sabia utilizar as melhores tecnologias de sua época. É necessário conhecer como funciona o sensor ultrassônico para fazer as medições? Quais os ajustes que tivemos que fazer para poder medir corretamente o que queríamos?”

Com base na palavra usada na questão 4e, “ajuste”, fizemos uma breve explicação para esclarecer que todo instrumento de medida está inserido algum desvio associada a qualquer medição e que nenhuma medição é perfeita, toda medição está associada a alguma incerteza. Citamos como exemplo, à diferença de se medir a altura de uma pessoa com uma trena e com uma régua de 30 cm. Depois disso, explicamos à diferença de medir a altura de uma pessoa em pé e depois deitada.

Orientamos os alunos para responderem essa questão a partir dos ajustes feitos no sensor ultrassônico e dos ajustes nas medidas, ao que o grupo respondeu:



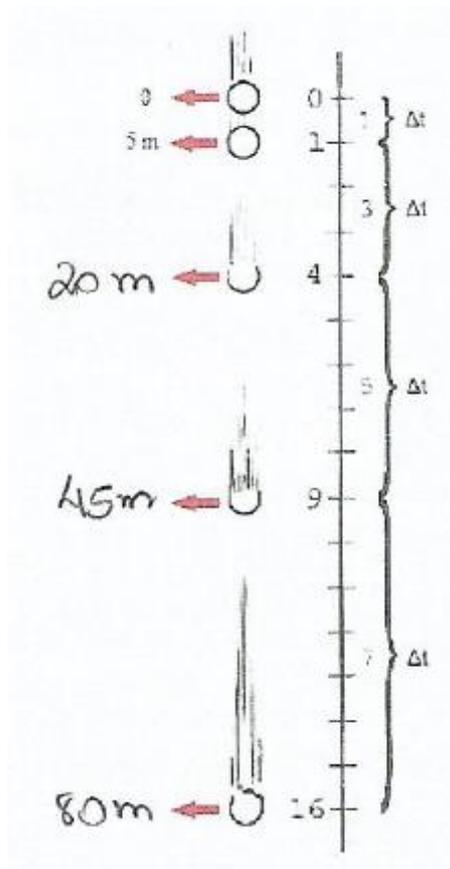
Existe o efeito da resistência do ar.
O sensor ultrassônico depende da temperatura e depende da distância entre transmissor e receptor. Ele não mede bem antes de 20 cm.
Para as medidas tem que se utilizar do Audição os dados e depois lançar no excel.
Foi ajustado no início o tempo e a distância em zero.
O sensor possui um erro de 3 milímetros para todas as medidas.

Essa questão foi feita em conjunto com eles para que eles percebessem as dificuldades que tivemos que enfrentar para melhor refinar as medidas com o sensor ultrassônico.

Para finalizar a atividade 4 não poderíamos deixar de destacar aos alunos a relação ímpar da queda dos corpos.

Questão 4f: “Da proporcionalidade entre o espaço percorrido e o quadrado dos tempos ($S=kt^2$), Galileu descobriu uma propriedade simples e bela, a saber, que os espaços percorridos em tempos iguais sucessivos em movimentos uniformemente acelerados estão “entre si assim como os números ímpares a partir da unidade, a saber, 1, 3, 5, 7, 9...” Vamos

utilizá-la. Como pode se ver na figura abaixo, um corpo que cai a partir do repouso e sem atrito, no primeiro intervalo de tempo Δt o corpo percorre a distância $1d$, no segundo Δt a distância $3d$ (totalizando $4d$), no terceiro Δt a distância $5d$ (totalizando $9d$), e assim por diante. Vamos supor que cada distância “ d ” valha 5 metros, preencha as posições em cada Δt da queda da bolinha.”



Nas setas em sequência de cima para baixo os alunos deveriam responder com as respectivas posições da queda da bolinha. Pedimos para que respondessem usando a relação ímpar de Galileu. Como no exercício já constam duas posições já feitas, os alunos deveriam responder as outras três posições. Inicialmente os alunos responderam a questão 4f colocando o valor do deslocamento da bolinha (Δd) ao lado da flecha vermelha, eles não se atentaram à diferença entre deslocamento e posição da bolinha. Depois de explicar essa diferença, os alunos refizeram a questão 4f.

4.8 ATIVIDADE 5: AFINAL, GALILEU FEZ OU NÃO FEZ O FAMOSO EXPERIMENTO DA TORRE DE PISA?

Nesta última atividade, nosso enfoque era demonstrar aos alunos que tanto a teoria de Aristóteles quanto algumas afirmações de Galileu não se sustentariam no experimento da queda de corpos na Torre de Pisa. Também exercitamos em nossos alunos para que eles atentassem em relacionar os avanços científicos com o contexto histórico que Galileu vivia.

Por meio de uma aula expositiva, essa atividade foi orientada fortemente de acordo com o conteúdo da seção 3.2, sendo destacadas na lousa as principais passagens dessas seções.

Explicamos o relato de Viviani acerca da lenda do experimento da Torre de Pisa inserido no contexto socioeconômico do século XVII.

Depois de percorrermos o relato de Viviani, utilizamos a carta de Renieri a Galileu que conta a tentativa fracassada de Renieri em reproduzir o experimento da Torre de Pisa.

Em seguida reforçamos as considerações de Casper (1977) e Franklin (1979) de que tanto a previsão de Aristóteles, de que a velocidade da queda era proporcional ao peso do objeto, quanto à previsão do próprio Galileu, de que os objetos chegariam juntos ao chão, independentemente do seu peso, não dariam conta de explicar a queda das esferas do alto da Torre. Fica evidente que a previsão de Aristóteles não dá conta de explicar o fenômeno, mas a de Galileu também não explica esse fenômeno, pois aqui há uma razoável interferência da resistência do ar no experimento da Torre de Pisa. Casper (1977) e Franklin (1979) já ressaltaram que bolas soltas de uma determinada altura como da Torre de Pisa, não atenderia a previsão galileana.

As considerações de Hessen (1931) deixam em evidência que a racionalidade da ciência era para servir aos interesses da nova classe dominante, sobretudo aos interesses militares e problemas técnicos que Galileu sabia resolver, sobretudo na fabricação de armas e trajetória dos projéteis. O problema da trajetória da bala inspirou Galileu a estudar o movimento dos corpos, resistência e velocidade, a queda livre dos corpos, como pode-se ver a dedicatória ao Arsenal de Veneza que Galileu faz na introdução do livro “*Dois Novas Ciências*”

Mariconda (2006a) faz uma leitura de Galileu como o fundador da física clássica e do método experimental, deixando claro que a ciência está inserida em um processo histórico-social que depende da cooperação de muitos.

Após a aula expositiva baseada na seção 3.2, os alunos responderam as questões da atividade 5.



Figura adaptada de DRAKE. S, Galileo: a very short introduction Drake, Oxford University Press, 2001, p. 23.

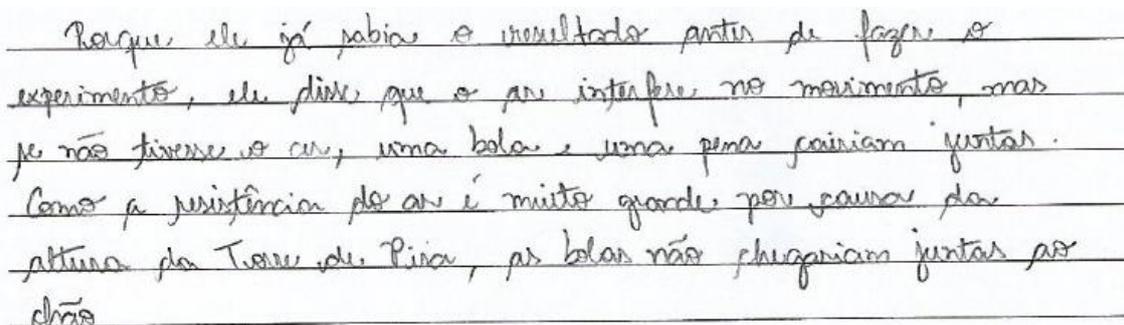
“Foi então que, para grande indignação de todos os filósofos, ele [Galileu] demonstrou — com o auxílio de experiências, provas e raciocínios exatos — a falsidade de numerosíssimas conclusões de Aristóteles sobre a natureza do movimento, conclusões que, até então, eram tidas como perfeitamente claras e indubitáveis. Assim, entre outras, a de que as velocidades de móveis da mesma matéria, mas desigualmente pesados e movendo-se através do mesmo meio, não obedecem a proporção de seus pesos, como é declarado por Aristóteles, mas se movem, todos, com a mesma velocidade. O que demonstrou em repetidas experiências, feitas no alto do campanário de Pisa, na presença de todos os outros professores e filósofos e de toda a Universidade. (relato de Vincenzo Viviani, o primeiro biógrafo de Galileu, publicado em 1717).”

“Na atividade anterior, utilizamos o sensor ultrassônico para medirmos os tempos de queda de diferentes objetos. Porém é necessário observar que fizemos uma comparação com

o experimento da Torre de Pisa, isso não quer dizer, que reproduzimos o experimento nas mesmas condições que foram soltas as bolas de ferro do lendário experimento da Torre de Pisa.”

“A lendária história do experimento da Torre de Pisa é uma das mais famosas narrativas da história da ciência, essa narrativa conta que Galileu, em 1590, subiu ao topo da torre inclinada de Pisa, e lá do alto soltou dois objetos de pesos diferentes, com a finalidade de contestar a lei da queda de Aristóteles, lei esta que afirmava que a velocidade de queda dos corpos é proporcional ao seu peso. Com esta exposição do alto da torre inclinada, Galileu demonstrou aos professores e alunos reunidos em volta da torre que Aristóteles estava errado.”

Na questão 5a: “Como já vimos durante a aula de hoje, muito provavelmente, Galileu não fez o experimento da Torre de Pisa. Por que Galileu não fez esse experimento?”



Porque ele já sabia o resultado antes de fazer o experimento, ele disse que o ar interfere no movimento, mas se não tivesse o ar, uma bola e uma pena cairiam juntas. Como a existência do ar é muito grande por causa da altura da Torre de Pisa, as bolas não chegariam juntas ao chão.

Nessa questão 5a, o objetivo é salientar que o experimento é guiado pela teoria, como Galileu já tinha uma teoria de queda dos corpos, ele sabia de antemão que duas bolas de diferentes pesos soltas da Torre de Pisa não cairiam juntas.

Investimos novamente nas considerações de Casper (1977) e Franklin (1979) acerca do experimento da Torre de Pisa. Após nossas considerações, deixamos cientes os alunos que se Galileu realmente fizesse o experimento da Torre de Pisa, ele não conseguiria provar por sua teoria de queda.

Na questão 5b: “A evolução dos trabalhos da ciência é um processo histórico-social que depende da cooperação de muitas pessoas, mas é razoável creditar a Galileu a fundação da física clássica”.

“A introdução das práticas científicas no estudo dos fenômenos naturais favoreceu a consolidação da união entre a ciência e a técnica, pois uniu a teoria, o instrumento e o experimento. Qual a importância da união entre a ciência e a técnica do ponto de vista da ciência galileana e qual o conflito dessa união com a doutrina aristotélica?”

Para Galileu, a Teoria tem que ser feita com atenção em ser provada pela experiência.

Já a doutrina de Aristóteles não se importava com provas as coisas, nas universidades na época de Galileu não se fazia experimentos nas universidades só ensinavam Teorias.

Os alunos conseguiram entender uma diferença básica entre a física de Galileu e a de Aristóteles. Pela leitura de Mariconda (2006a), Galileu tinha uma atitude ativa acerca da ciência e a doutrina aristotélica propunha uma atitude contemplativa dos fenômenos naturais.

Antes de encerrar nosso trabalho com os alunos, finalizamos a aula enfatizando que em um aparente simples movimento de queda de um objeto, pode-se conhecer que houve uma das maiores revoluções científicas do espírito humano.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelas respostas que os estudantes deram nas atividades em grupo, pela interação social e mediação na relação professor-aluno durante todo o trabalho dessa dissertação, sugere-se que os estudantes tiveram bons indicadores de aprendizagem nos assuntos que envolveram a famosa lenda do experimento da Torre de Pisa. Além de vivenciarem atividades práticas em física, os estudantes puderam ter contato com alguns conceitos chave para entender a cinemática escalar, como o conhecimento do movimento uniforme e movimento uniformemente variado inserido no experimento da Torre de Pisa.

Os estudantes puderam vivenciar que em um movimento aparentemente simples, como a queda de bolas do alto de uma torre, há um embate científico da mais alta riqueza cultural para a formação de um espírito científico e para visão menos mitificada da ciência. Galileu fazia experimentos mentais para questionar a doutrina aristotélica, como o clássico experimento das duas pedras conjugadas; fazia experimentos reais, técnicos, algo que era visto como “segunda classe” pelos filósofos peripatéticos colegas de Galileu nas universidades; Galileu utilizava a matemática como linguagem universal para o entendimento dos fenômenos naturais; e fazia previsões com base na união entre ciência e técnica. Todos esses elementos foram repassados aos estudantes de acordo com os seus conhecimentos prévios, na tentativa deles conseguirem absorver o conteúdo das cinco atividades que fizemos com eles. Nessas atividades os alunos entraram em contato com um tópico de física, a cinemática escalar, sobretudo o movimento uniformemente acelerado da queda de um móvel. Eles puderam levantar hipóteses para analisar os problemas envolvidos nas atividades e

analisaram alguns aspectos socioeconômicos e teóricos inerentes ao processo do desenvolvimento científico da época de Galileu.

Todos os cinco alunos marcaram presença em todas as atividades e puderam utilizar a plataforma Arduino para extrair os dados da queda dos objetos e interpretá-los juntamente com planilhas eletrônicas. Os alunos obtiveram o valor de aceleração da gravidade de $9,76 \text{ m/s}^2$, valor bem próximo da aceleração da gravidade mais aceita para região de Campinas. O sensor ultrassônico mostrou-se que pode ser utilizado para analisar quedas verticais, mas também é de grande valia se for usado para outros experimentos como o próprio plano inclinado de Galileu ou registrar o movimento de pêndulo simples. O autor desse trabalho de mestrado fez um plano inclinado e obteve resultados muitos satisfatórios.

Ao vivenciarem uma atividade prática, foi cobrado para que os estudantes pudessem entender que a física para Galileu precisava do experimento como comprovação da teoria. Para Mariconda (2006a) a ciência aristotélica remetia a uma atitude contemplativa da natureza, enquanto para Galileu o estudo da natureza exigia uma atitude ativa.

Como os professores das universidades colegas de Galileu, eram, em sua grande maioria, professores peripatéticos, estes não viam necessidade em “dominar” a natureza, diferentemente da postura de Galileu que em suas ideias tentava em extrair o conhecimento da natureza pela experimentação conduzida pela teoria.

O questionário de levantamento de ideias prévias juntamente com as 5 atividades que compõe o trabalho pode ser melhor aplicado em turmas de alunos no período extracurricular se tiver apenas um aparato experimental construído. Pode-se construir mais aparatos experimentais para incluir mais alunos nessas atividades de acordo com a realidade escolar do professor. O produto educacional foi estruturado para que o professor trabalhe com os alunos os tópicos de atividade experimental e de história da ciência em conjunto presentes no experimento da Torre de Pisa, incluindo a disciplina curricular de cinemática escalar obrigatória nas escolas do país.

Ao ter contato com elementos de história da ciência e atividades práticas relacionadas ao experimento da Torre de Pisa, pode-se dizer que esse trabalho feito com os estudantes foi útil para o enriquecimento das aulas sobre a queda dos corpos. Ao juntar teoria de aprendizagem, história da ciência e atividade práticas, podemos dizer que existe um bom caminho para a prática pedagógica diária com nossos estudantes.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. S. T de. Atividades experimentais no ensino de física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 25, n. 2, p. 176-194, 2003.

AZEVEDO, H. L. MONTEIRO, F. N. SANTOS T. P dos, CARLOS J. G., TANCREDO B.N. O uso do experimento no ensino de física: tendências a partir do levantamento dos artigos em periódicos da área no Brasil. *In: VII ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS*, Florianópolis, 2009.

BANZI, M. Getting Started with Arduino. Sebastopol: O'Reilly Media, 2009.

BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. v. 19, n. 3, p. 291-313, Nov. 2002.

CASPER, B. M. Galileo and the fall of Aristotle: a case of historical injustice? American Journal of Physics, v. 45, n. 4, Apr. 1977.

CAVALCANTE, M. A. RODRIGUES, T. T. T. BUENO, D. A. Controle remoto: observando códigos com Arduino (parte 2 de 2). Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 31, n. 3, p. 614-641, Jun. 2014.

CAVALCANTE, M. A. TAVOLARO, C. R. C. MOLISANI, E. Física com Arduino para iniciantes. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 4, p. 1-9, Dez. 2011.

COLUCI, V. R. PAULINO, G. SOUZA, D. VASCONCELOS, E. P. R. Ilustração de incertezas em medidas utilizando experimentos de queda livre. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 2, p. 1-6, Mai. 2013.

COOPER, L. Aristotle, Galileo and the tower of Pisa, Menasha: Cornell University Press, 1935.

CORDOVA, H e TORT, A.C. Medida de g com a placa Arduino em um experimento simples de queda livre. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 38, n. 2, p. 1-5, Jan. 2016.

CREASE, R. P. Os dez mais belos experimentos científicos, Rio de Janeiro: Zahar, 2006.

DRAKE, S. Galileo at work. Chicago: University of Chicago Press, 1978.

DUARTE, N. Os conteúdos escolares e a ressurreição dos mortos: contribuição à teoria histórico-crítica do currículo. Campinas: Autores Associados, 2016.

FRANKLIN, A. Galileo and the leaning tower: an Aristotelian interpretation. Physics Education, v. 14, 1979.

GALERIU, C. et al. An Arduino Investigation of Simple Harmonic Motion. The Physics Teacher, v. 52, p. 157-159, Mar. 2014.

GALILEI, G. Duas novas ciências. 2ª edição. São Paulo: Nova Stella, 1988 [1638].

GALILEI, G. Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano. São Paulo: Editora 34, 2011 [1632].

GASPAR, A. MONTEIRO, I, C, C. Atividades experimentais de demonstrações em sala de aula: uma análise segundo o referencial da Teoria de Vygotsky. Investigações em Ensino de Ciências, v. 10(2), p. 227-254, 2005.

GASPAR, A. Atividades experimentais no ensino de física: uma nova visão baseada na teoria de Vigotski. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

GREGORY, R. A. Discovery, or the Spirit and Service of Science, London: Macmillian and Co., 1917.

HESSEN, B. As raízes socioeconômicas dos “Principia” de Newton. *In: II CONGRESSO INTERNACIONAL DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA E DA TECNOLOGIA*, Londres, 1931. Tradução Ruy Gama e Sylvia Ficher, 1993.

HEWITT, P. Física Conceitual, 12ª edição, Porto Alegre: Editora Bookman, 2015.

HODSON, D. Experiments in science and science teaching. Educational Philosophy and Theory, v. 20, p. 53 - 66, 1988.

KUHN, T. A Estrutura das Revoluções Científicas, 13ª edição. São Paulo: Editora Perspectiva, 2003.

KOYRÉ, A. Estudos de História do Pensamento Científico, Rio de Janeiro: Editora Forense Universitária, 1982.

LABURÚ, C. E. Fundamentos para um experimento cativante. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 23, n. 3, p. 382-404, Out. 2006.

LABURÚ, C. E. Seleção de experimentos de física no ensino médio: uma investigação a partir da fala dos professores. Investigação em Ensino de Ciências, v. 10(2), n. 2, Abr. 2005.

LEDERMAN, L. M. TERESI, D. The God Particle, New York: Bantam Press, 1993

MACISSAC, D. Hämäläinen, A. Physics and technical characteristics of ultrasonic sonar systems. The Physics Teacher, v. 40, p. 39-46, 2002.

MARICONDA, P. Introdução. *In: GALILEI, G. Duas novas ciências*. 2ª edição. São Paulo: Nova Stella, 1988 [1638], p. xxvii-xxxi.

MARICONDA, P. R. Galileu e a Ciência Moderna. Cadernos de Ciências Humanas – Especiaria, v. 9, n.16, p. 267-292. Dez. 2006a.

MARICONDA, P. R.; VASCONCELOS, J. Galileu e a Nova Física, São Paulo: Odysseus, 2006b.

MARTINS, R. de A. Introdução: A história das ciências e seus usos na educação. *In*: SILVA, C. C. (org.). Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino. 1ª edição. São Paulo: Livraria da Física, 2006, p. xxi-xxxiv.

MARX, K e ENGELS, F. A ideologia alemã, 2ª edição. São Paulo: Martins Fontes, 2001.

MARX, K. O capital, livro I, 2ª edição. São Paulo: Boitempo, 2017.

MATHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.

MORAES, J.U.P. JÚNIOR, R.S.S. Experimentos didáticos no ensino de física com foco na aprendizagem significativa. Aprendizagem Significativa em Revista, v. 4(3), p. 61-67, Mar. 2014.

PASQUALINI, J. C. O papel do professor e do ensino na educação infantil: a perspectiva de Vigotski, Leontiev e Elkonin. *In* MARTINS, L. M. DUARTE, N. (orgs.). Formação de professores: limites contemporâneos e alternativas necessárias. São Paulo: Editora UNESP, 2010, p. 161-191.

PENA, F.L.A, FILHO, A.R. Obstáculos para o uso da experimentação no ensino de física: um estudo a partir de relatos de experiências pedagógicas brasileiras publicados em periódicos nacionais da área (1971-2006). Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, v. 9(1), p. 5-17, Fev. 2009.

PINO, A. O social e o cultural na obra de Lev S. Vigotski. Educação & Sociedade, Campinas, ano XXI, n.71, p. 45-78, Jul. 2000.

ROSSING, T.D. Principles of vibrations and Sound. 2ª edição. New York: Springer-Verlag, 2004.

SEGRE, M. Galileo, Viviani and Tower of Pisa, Studies in History and Philosophy of Science, v. 20, n. 4, p. 435-454, 1989.

SILVEIRA, F. L. Determinando a aceleração gravitacional. Revista de Ensenanza de la Física, Córdoba, v. 10, n. 2, p. 29-35, 1995.

SOUZA, A. R. PAIXÃO, A. C. UZÊDA, D. D. DIAS, M. A. DUARTE, S. AMORIM, H. S. A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 1, p. 1-5, Mar. 2011.

VIGOTSKI, L. S. A construção do pensamento e da linguagem. 2ª edição. São Paulo: Martins Fontes, 2010.

VYGOTSKI, L. S. Obras escogidas. Madrid: Visor, 1995 tomo III

VYGOTSKI, L. S. Obras escogidas. Madrid: Visor, 1997 tomo V

VUOLO, J. H. Fundamentos da teoria de erros. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blucher, 1996.

Apêndice

PRODUTO EDUCACIONAL



Figura adaptada de DRAKE. S, Galileo: a very short introduction Drake, Oxford University Press, 2001, p. 23.

Este produto educacional tem como objetivo principal fazer com que o professor de física trabalhe o conceito de queda livre utilizando atividades experimentais paralelamente com elementos de história da ciência. Junto aos estudantes do Ensino Médio, o professor poderá verificar experimentalmente a proporção quadrática de Galileu (S dependente t^2) medida pelo sensor ultrassônico e explicar a dependência das descobertas feitas por Galileu com o contexto socioeconômico da época em que ele vivia, sobretudo presente no lendário experimento da Torre de Pisa.

O aparato experimental de baixo custo foi utilizado para medir distâncias. Este é composto basicamente por um sensor ultrassônico microcontrolado por Arduino. Neste produto educacional estão contidas as informações para montagem, operação, programação e lista de materiais para manuseio do aparato experimental do sensor ultrassônico.

Para a investigação histórica do lendário experimento da Torre de Pisa, está disponibilizado textos complementares sobre essa lenda que pode ser trabalhada com os estudantes simultaneamente com o aparato experimental.

Por fim, fizemos um levantamento de ideias prévias e um conjunto de 5 atividades e para ser trabalhado com os alunos de Ensino Médio.

Pelo baixíssimo custo do aparato experimental, se comparados com os equipamentos de empresas do ramo, e pelos textos históricos sobre a lenda da Torre de Pisa, acreditamos que este produto educacional auxilie o professor a sensibilizar seus estudantes a entenderem que a física no sentido moderno, da época de Galileu até aos nossos dias, significa a interpretação dos fenômenos naturais pela união entre teoria e técnica, ou seja, pela aplicação do método científico.

Para entrar em contato conosco, envie um e-mail para
welder.meson@gmail.com

O autor.

Este material foi produzido no Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba (PROFIS-So)
Sorocaba, fevereiro de 2019.

SUMÁRIO

A.1 O ARDUINO	121
A.1.1 A PLACA ARDUINO	121
A.1.2 O PROGRAMA ARDUINO IDE	122
A.1.3 O SENSOR ULTRASSÔNICO HC-SR04	125
A.2 GALILEU E A TORRE DE PISA	127
A.2.1 GALILEU EM SEU TEMPO	127
A.2.2 O EXPERIMENTO DA TORRE DE PISA	130
A.3 CONTEÚDO DE FÍSICA PRESENTE NAS <i>DUAS NOVAS CIÊNCIAS</i>	137
A.4 O APARATO EXPERIMENTAL DE QUEDA VERTICAL	146
A.5 REFERENCIAL TEÓRICO	159
A.6 ATIVIDADES COM OS ESTUDANTES	164
LEVANTAMENTO DE IDEIAS PRÉVIAS	165
ATIVIDADE 1	167
ATIVIDADE 2	169
ATIVIDADE 3	171
ATIVIDADE 4	177
ATIVIDADE 5	181
REFERÊNCIAS	184

Uma aranha executa operações semelhantes às do tecelão, e uma abelha envergonha muitos arquitetos com a estrutura de sua colmeia. Porém, o que desde o início distingue o pior arquiteto da melhor abelha é o fato de que o primeiro tem a colmeia em sua mente antes de construí-la com a cera. No final do processo de trabalho, chega-se a um resultado que já estava presente na representação do trabalhador no início do processo, portanto, um resultado que já existia idealmente (MARX, 2017, p. 255-256).

A.1 O ARDUINO

Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto que utiliza a linguagem de programação inspirada no C/C++ desenvolvida por Massimo Banzi e seus colaboradores, inicialmente destinado a educadores envolvidos com projetos de eletrônica e robótica, mas também para amadores que procuram “hardware” acessível e “software” relativamente fácil de usar. A placa Arduino utiliza um único microprocessador funcionando em 16 MHz com um núcleo de 8 bits e tem uma quantidade limitada de memória disponível, com 32 kB de memória *flash* (onde 0,5 kB usado pelo *bootloader*) e 2 kB de SRAM (BANZI, 2009).

O Arduino é composto de duas partes principais: a placa Arduino, que é a placa eletrônica (o hardware) onde insere os programas e o conecta aos dispositivos eletrônicos; e o Arduino IDE (*Integrated Development Environment*), o programa (*software*) para trabalhar no computador. O IDE é usado para criar um programa que pode ser enviado à placa Arduino.

A.1.1 A Placa Arduino

A placa Arduino é uma pequena placa microcontroladora. Este microcontrolador é um circuito integrado que basicamente é o “cérebro” da placa, contém as funções principais de um computador tradicional só que em um pequeno “chip” de 28 pinos. A placa do Arduino é composta principalmente por um microcontrolador ATMEL/ATmega 328, um dispositivo de 8 bits da família AVR. Ele conta com 32 kB de memória flash (mas 512 Bytes são utilizados pelo *bootloader*), 2 kB de memória SRAM e 1 kB de memória EEPROM. Pode operar a até 20 MHz, porém na placa Arduino UNO opera em 16 MHz, valor do cristal externo que está conectado aos pinos do microcontrolador.

Na placa Arduino há todos os componentes necessários para que este microcontrolador funcione corretamente e se comunique com o computador. Existem muitas

versões do Arduino, a versão usada neste trabalho é o Arduino UNO, que é o mais simples de usar e tem o preço mais acessível. O Arduino UNO, figura A.1, contém essas especificações: 14 portas digitais, que são pinos digitais “IO” (*input* e *output*) de pinos 0 a 13, que podem ser entradas ou saídas, especificadas pelo programa criado no IDE; e 6 portas analógicas, que são pinos de entrada analógica (pinos 0 a 5).

A placa pode ser alimentada a partir da porta USB do computador, da maioria dos carregadores USB ou de uma fonte de alimentação externa de 9 V recomendada pelo fabricante.

Figura A.1 - Placa Arduino UNO com especificações de entradas e saídas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Não foi preciso usar uma placa Arduino que faz cálculos mais rápidos e conseqüentemente custar mais cara. A facilidade da placa Arduino UNO é que o seu menor custo poderia atrair o uso de um número maior de escolas.

A.1.2 O Programa Arduino IDE

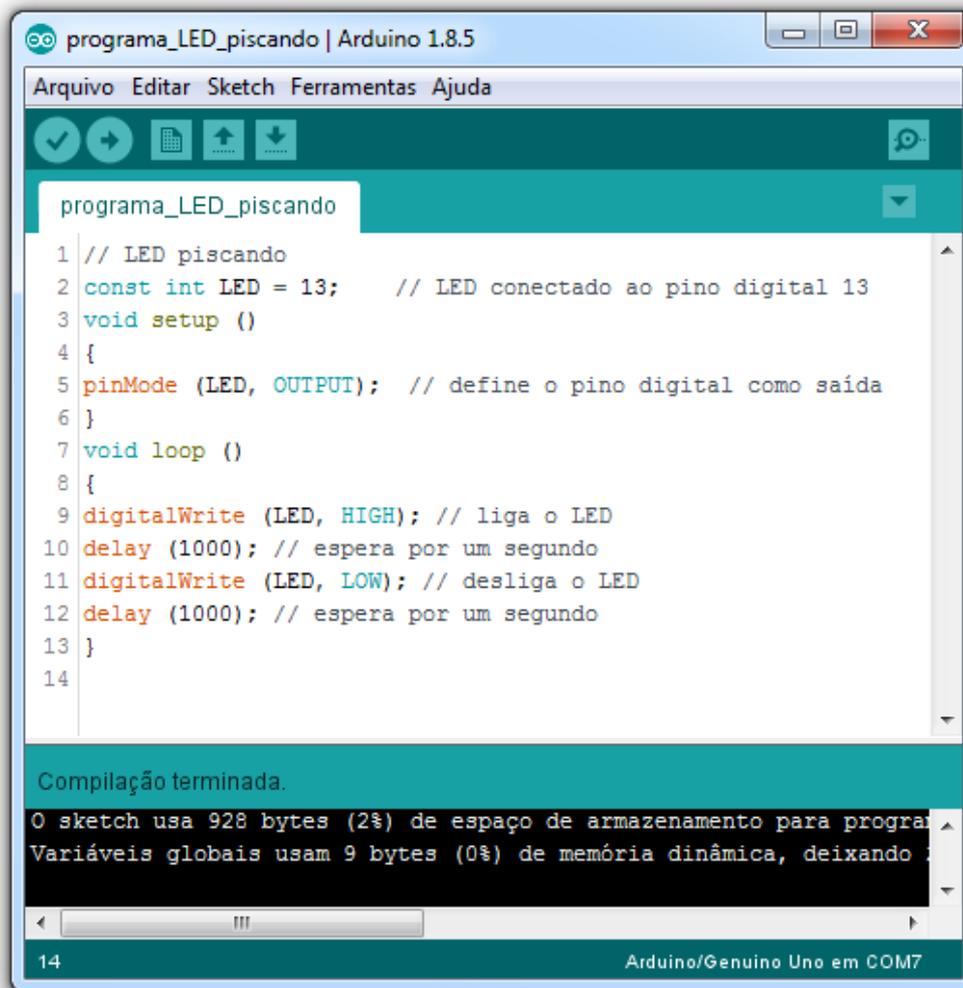
O Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) é um ambiente de programação que permite ao usuário esboçar diferentes tipos de programas e carregá-los no microcontrolador Arduino. O Arduino usa uma linguagem de programação acessível, baseada na linguagem de programação chamada *Processing*. Depois que o usuário escreve seu código, o IDE compila e carrega o programa para o microcontrolador Arduino. O Arduino IDE possui um analisador de código interno que verifica o código do usuário antes de enviá-lo ao Arduino. O *software* IDE inclui o conjunto de diferentes tipos de programas que estão prontos para serem testados no dispositivo. Depois de testar o programa, ele pode ser enviado para o

Arduino por cabo USB (BANZI, 2011). A figura A.2 mostra uma captura de tela do Arduino IDE.

O Arduino IDE foi desenvolvido, principalmente, para as pessoas com conhecimentos limitados de programação. O código IDE do Arduino é chamado de "sketch". O editor do código possui recursos que usamos no dia a dia, como realce de sintaxe, recuo automático, etc. Um clique do mouse é suficiente para compilar e carregar programas em uma placa do Arduino. Os códigos IDE do Arduino são escritos na linguagem de programação C/C++. Basicamente, todo programa que é executado em um "loop infinito" é construído por duas funções: `setup ()` e `loop ()`. O "**setup ()**" é chamado no início do programa para inicializar as configurações, como portas e periféricos de entradas e saídas. O "**loop ()**" é uma função que gera um "loop" com o conteúdo declarado. O conteúdo da função "loop" é repetidamente executado em um "loop" infinito.

Na figura A.2 está exposto um exemplo de programação básica para familiarizarmos com o Arduino. É um programa simples que faz um LED piscar em um intervalo de 1 segundo consecutivamente. As placas Arduino são instaladas com um LED e um resistor no pino 13. O programa abaixo na figura A.2 indica um LED piscando. Quando executado o programa, liga o LED conectado ao pino 13 por um segundo e o desativa por um segundo repetidamente pela função "**loop()**". A figura A.3 mostra os LEDs da placa acesos, tanto o LED da própria placa, quanto o LED conectado no pino 13. Vale lembrar que para não danificar o LED externo, é importante colocar um resistor em série com ele. O programa transforma o pino 13 em uma saída (apenas uma vez no início) pela função `setup()`; entra em um loop; liga o LED conectado ao pino 13 (figura A.3); espera por um segundo; desliga o LED conectado ao pino 13; e espera por um segundo e volta para o início do "loop".

Figura A.2 - Exemplo de programa do Arduino que faz o LED piscar a cada 1 s.



```
programa_LED_piscando
1 // LED piscando
2 const int LED = 13; // LED conectado ao pino digital 13
3 void setup ()
4 {
5   pinMode (LED, OUTPUT); // define o pino digital como saída
6 }
7 void loop ()
8 {
9   digitalWrite (LED, HIGH); // liga o LED
10  delay (1000); // espera por um segundo
11  digitalWrite (LED, LOW); // desliga o LED
12  delay (1000); // espera por um segundo
13 }
14

Compilação terminada.
O sketch usa 928 bytes (2%) de espaço de armazenamento para programar
Variáveis globais usam 9 bytes (0%) de memória dinâmica, deixando
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura A.3 - LEDs acesos. LED laranja da placa e LED azul conectado ao pino 13 acendendo durante execução do programa da figura A.2.



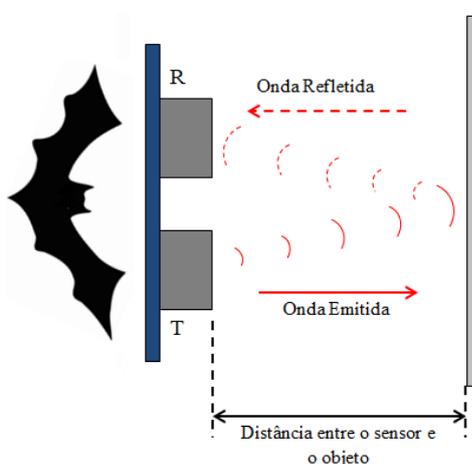
Fonte: Elaborado pelo autor.

A.1.3 O Sensor Ultrassônico HC-SR04

Além da placa Arduino, são fornecidos vários sensores e atuadores que podem ser conectados nele. São componentes eletrônicos periféricos que interagem com o Arduino.

O sensor ultrassônico é feito com material piezoelétrico que emite ondas ultrassônicas no espaço aberto onde quer que seja montado e depois recebe as ondas refletidas. Utilizamos o sensor de movimento ultrassônico com os alunos. Mais especificamente usamos o sensor ultrassônico chamado HC-SR04 que emite ondas ultrassônicas em 40 kHz para determinar a distância de um objeto a partir do tempo de voo do som. É um sensor de distância sem contato com módulos separados de transmissão e recepção da onda ultrassônica. A onda ultrassônica é gerada por um material piezoelétrico que atua como transdutor. Fornecido ao material uma tensão, ele vibra emitindo a onda de ultrassom (no transmissor). Do outro lado, o transdutor como o receptor irá converter ondas ultrassônicas refletidas em grandeza elétrica. O processo de funcionamento do sensor ultrassônico é semelhante ao fenômeno de ecolocalização usado pelos morcegos para detectar o local dos objetos ou a da presa. Isso é usado por vários animais que atuam como sensores ultrassônicos emitindo as chamadas e, em seguida, recebem os ecos de suas chamadas que se recuperam de vários objetos (figura A.4). Esses ecos os ajudam a encontrar e identificar os objetos próximos a eles. Os morcegos têm o potencial de produzir sons que estão além das habilidades auditivas dos ouvidos humanos, portanto eles enviam esses sons e ouvem os ecos ressaltados produzindo informações visuais e sonoras quando ouvem os ecos para identificar os objetos.

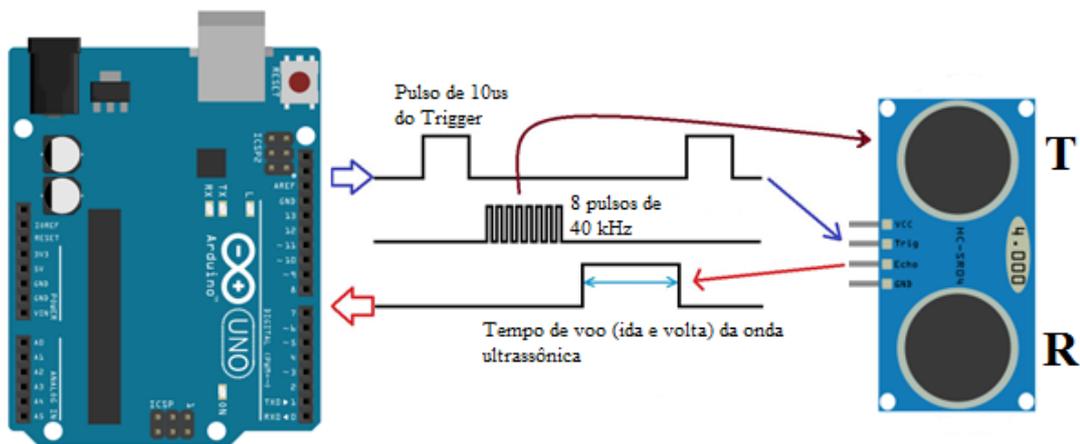
Figura A.4 - Representação do sensor ultrassônico HC-SR04 em funcionamento. “T” é inicial de transmissor e “R” de receptor



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sensor ultrassônico HC-SR04 é usado para medição de distâncias de 2 cm até 4 m, com incerteza de $\pm 0,3$ cm, com medidas efetivas de distâncias em um ângulo de até 15° . Não foi testado se o sensor mede distâncias de até 4 m, o máximo que medimos foi de 2 m de altura, o que está razoável para nossos anseios. O sensor ultrassônico HC-SR04, possui quatro pinos: dois pinos de tensão de alimentação, Vcc (tensão de 5V) e GND (0V); e dois pinos de sinais, um pino de entrada (*trig*) e outro pino de saída (*echo*). Este sensor inicia seu funcionamento com um pulso de disparo (*trigger*) de 10 microssegundos para produzir 8 pulsos de ondas ultrassônicas a 40 kHz pelo transmissor (figura A.5). Nesse intervalo, o sensor mede o tempo até detectar a onda refletida pelo receptor (*echo*).

Figura A.5 - Representação dos pulsos ultrassônicos entre o sensor e o Arduino.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distância calculada é proporcional à duração desse pulso. Para calcular a distância, vale ressaltar que a onda ultrassônica percorre duas vezes a mesma distância, então na eq. (A.1) segue o cálculo para obter a distância:

$$d = \frac{v_{\text{som}} \cdot \Delta t}{2}, \quad (\text{A.1})$$

Para obter melhores resultados, os sensores ultrassônicos deverão ser orientados de maneira que as ondas sonoras atinjam os objetos tão perto quanto possível da linha perpendicular entre o sensor e objeto. Outro fator de operação do sensor diz respeito à **zona morta**, que é a região que determina a menor distância de detecção. Nenhum objeto deve ser colocado na zona morta, porque isso pode levar a medições incorretas, a zona morta do sensor

HC-SR04 é até 2 cm do sensor até o objeto, quer dizer, este sensor começa a efetuar boas medidas a partir de 2 cm.

A.2 GALILEU E A TORRE DE PISA

A.2.1 Galileu em seu Tempo

Galileu Galilei certamente representa uma figura de tremenda estatura na fundação da física clássica e no desenvolvimento do método experimental da ciência. Em qualquer leitura que se queira ter uma noção estrutural da história da ciência, essa leitura sempre será confrontada por uma ou mais façanhas atribuídas a Galileu. Este aperfeiçoou a luneta, fazendo grandiosas descobertas celestes, fundando a astronomia moderna; desenvolveu a teoria dos movimentos, elucidando o movimento de queda livre e movimento acelerado; estudou a resistência dos materiais o que atualmente é a engenharia civil. Não é exagero mencionar que é dado o crédito a Galileu o reconhecimento de fundador da física no sentido moderno.

Apesar dos grandes feitos de Galileu, isso não quer dizer que os trabalhos desenvolvidos por ele dependeram somente de sua genialidade como físico-geômetra sem qualquer influência de fatores externos na construção da ciência galileana.

No início do século XX, historiadores da ciência começaram a criticar a visão positivista da ciência, que se baseava em acreditar que a metodologia científica era independente em relação aos acontecimentos externos. Kuhn (2003) fez uma leitura de que a inquietação dos historiadores da ciência residia no fato de que ao localizar o momento do desenvolvimento de determinada lei ou teoria científica, não caberia separá-la dos conhecimentos extracientíficos ou de teorias declaradas futuramente como “erradas”, isto é, não aceitas. Não havia como distingui-las do ponto de vista do passado, pois ambas resultavam dos mesmos métodos e se estabeleciam pelas mesmas razões.

Para responder esses questionamentos, os historiadores da ciência incluíram as forças externas para explicar a aceitação de algumas teorias em detrimento de outras. Para citar um exemplo, Boris Hessen, em uma palestra realizada em 1931, no II Congresso Internacional de História das Ciências e das Tecnologias em Londres, afirmou que o desenvolvimento científico do *Principia* de Newton foi impulsionado pela necessidade da burguesia mercantil como força econômica emergente em substituição ao feudalismo. A burguesia necessitava de infraestrutura para seu desenvolvimento mercantil, por isso tecnologias em transporte

marítimo, indústria da mineração e indústria da guerra eram privilegiadas aos olhos dessa nova classe dominante (HESSEN, 1993). A burguesia mercantil, para crescer e esse tornar hegemônica, precisava resolver problemas técnicos essencialmente mecânicos que o impediavam de crescer e se fortalecer como classe dominante:

A construção de canais, eclusas e navios; a construção de poços e de minas, sua ventilação, o bombeamento de água; o projeto de construção de armas de fogo e de fortificações; os problemas de balística; a produção e projeto de instrumentos para a navegação; a descoberta de métodos para o estabelecimento de rotas marítimas – tudo isso exigia um tipo de homem totalmente diferente daquele que até então estava sendo preparado pelas universidades (HESSEN, 1993, p. 46).

Influenciado por Marx, Hessen (1993) destacou a questão econômica, sobretudo as forças produtivas, como motivadoras do desenvolvimento científico e tecnológico. Para deixar evidente que os fatores externos influenciaram na produção intelectual, Hessen (1993) apoiou-se na obra *A Ideologia Alemã* (cf. Marx e Engels, 2001, p. 48) como fio condutor para entender a relação das classes dominantes com as ideias dominantes da sociedade, inclusive as ideias dominantes na ciência:

As ideias da classe dominante em cada período histórico são as ideias dominantes, e a classe dominante distingue suas ideias de todas as suas ideias anteriores, apresentando-as como verdades eternas. Esta classe deseja reinar eternamente e a (suposta) eternidade de suas ideias serve para fundamentar a inviolabilidade de sua dominação (HESSEN, 1993, p. 32).

Nesse contexto, o sucesso de Galileu Galilei em desenvolver sua ciência mecanicista residia no fato que o capital mercantil necessitava de sistemas mecânicos para desenvolver sua força produtiva. A burguesia necessitava de ciência e tecnologia necessariamente mecânicas. Galileu era professor de matemática, estudioso de balística e resistências dos materiais; residiu perto do imponente Arsenal de Veneza; e questionador das ideias de Aristóteles, filósofo que teve suas ideias científicas dogmatizadas pela Igreja, sendo esta defensora das ideias da economia feudal. Galileu, então, tinha todos os atributos necessários para despertar o interesse da burguesia que se firmava como nova classe dominante.

Além desses aspectos socioeconômicos da época de Galileu, concordamos em orientar nosso trabalho segundo a interpretação de Mariconda (2006a) concernente às quatro características fundamentais da modernidade científica encontrada nos feitos de Galileu, a saber: “centralidade da ação prática e instrumental; confluência e união da ciência e da técnica; matematização e mecanização da natureza; liberdade de pensamento ancorada no método” (MARICONDA, 2006a, p. 267).

Apesar de muitos estudos reforçarem a importância do ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, o que é muito bom para o Ensino de Física, no cotidiano das aulas, os alunos continuam com atitudes de “senso comum” que fogem da lógica galileana. Para tentar resolver esse “senso comum” sobre a queda dos corpos, precisamos nos esforçar para que nossos alunos adotem uma atitude mais voltada à ciência galileana, como em MARICONDA (2006a):

O que caracteriza a atitude científica galileana – e também a atitude científica moderna – é a procura, na natureza, de regularidades matematicamente expressáveis, as chamadas **leis da natureza**, e o método de certificar-se de sua verdade através da realização de **experimentos** (MARICONDA, 2006a, p. 269).

Para Mariconda (2006a), o homem medieval possuía uma atitude contemplativa em relação à natureza, enquanto o homem moderno do século XVII expressava uma atitude ativa, de dominação da natureza. No entanto, Galileu sofreu uma resistência dos seus pares nas universidades e da própria Igreja Católica, sendo esta entendida como força econômica feudal e maior detentora das terras da Europa, pois Galileu possuía uma atitude ativa na interpretação dos fenômenos naturais, enquanto os professores de sua época seguiam o cânone científico medieval.

A doutrina aristotélica, garantida pela autoridade dos séculos, consagrada por sua união à teologia católica e devido a sua conclusiva organicidade de princípios, permanecia como o fundamento sólido de toda educação teórica nas universidades, como o critério indiscutível de verdade para o mundo dos doutos, e seu autor, Aristóteles, como a autoridade incontestada nas ciências (MARICONDA, 2006a, p. 274).

Reforçando a diferença entre uma atitude ativa *versus* uma atitude contemplativa em relação à natureza, Hessen (1993) observou que as universidades feudais de doutrina aristotélica combatiam a nova ciência que florescia no século XVII:

Aquilo que não se encontrava em Aristóteles, para elas [universidades feudais] simplesmente não existia. Quando o padre Kircher (princípios do século XVII) sugeriu a um professor provincial jesuíta que observasse, através do telescópio, as recém-descobertas manchas solares, este respondeu: “É inútil, meu filho. Eu li Aristóteles duas vezes e não encontrei nada em suas obras sobre manchas no sol. Não existem tais manchas. Elas aparecem devido a imperfeições de seu telescópio ou a defeitos de seus próprios olhos”. Quando Galileu inventou o telescópio e descobriu as fases de Vênus, as companhias mercantis interessaram-se por seu telescópio, que era superior àqueles feitos na Holanda; mas os filósofos escolásticos das universidades se recusaram a ouvir falar nas novas descobertas (HESSEN, 1993, p.45).

Há outro aspecto de grande relevância na revolução científica do século XVII: a união entre ciência e técnica. Mariconda (2006a) relatou que para o mundo medieval, a ciência, estritamente teórica, era vista como superior à técnica, que era exercida, sobretudo, nas escolas de artesãos, nas escolas de artistas e arsenais do Renascimento. A ciência e a técnica eram completamente separadas e independentes, a doutrina aristotélica não tinha preocupação com consequências práticas e técnicas do cotidiano.

Já a ciência de Galileu unia a ciência e a técnica, mas não apenas no sentido de possuir resultados práticos, ou melhor, de estabelecer um tratamento matemático a situações físicas de caráter prático, mas também de ter a capacidade de ser controlada, testada e avaliada por esses efeitos práticos (MARICONDA, 2006a).

É bastante oportuno atribuir a Galileu a fundação da física clássica e do método experimental, mas vale ressaltar que concordamos com Mariconda (2006a), em que:

Exceto por atribuir ao indivíduo mais do que ele pode efetivamente fazer, porque, com efeito, a criação da física clássica e a invenção do método experimental são processos histórico-sociais que dependem do concurso dos humanos. São, nesse sentido, coletivos, pois dependem, para efetivar-se, de colaboração e organização (MARICONDA, 2006a, p. 288).

Como vimos, a ciência é uma criação humana feita por pessoas inseridas em um determinado contexto socioeconômico. O florescimento da física galileana no momento de transição do feudalismo para o capitalismo mercantil é um bom exemplo para entendermos a física clássica como processo histórico-social.

A.2.2 O Experimento da Torre de Pisa

Talvez a história da ciência mais famosa seja o lendário experimento do alto da Torre de Pisa feito por Galileu, um experimento que é revivido na maioria dos livros didáticos de física, textos e *sites* em todo o país. Crease (2002) pediu aos seus leitores da revista *Physics World*, em que é colunista, para que elegessem os dez mais belos experimentos de física. Em segundo lugar ficou o experimento de queda livre que Galileu fez, supostamente, do alto da Torre Inclinada de Pisa. Um detalhe foi o experimento do plano inclinado que ficou em oitavo lugar. Isso mostra como as pessoas consideram os feitos de Galileu como os mais belos da física. Dos dez experimentos mais belos da história da física, dois são atribuídos a Galileu. Apesar do apreço que os leitores dessa revista possuem sobre os experimentos de Galileu, é pouco provável que Galileu realmente tenha realizado o experimento da Torre de Pisa

Apesar de muitos historiadores da ciência considerar o evento da Torre de Pisa como falso, ainda se encontra em livros-texto do Ensino Médio a afirmação que Galileu realizou esse famoso experimento. Um exemplo recente está em um livro didático muito conhecido entre os professores de física, chamado *Física Conceitual* do professor de ensino médio do Hawaii, Paul Hewitt, que traz uma explicação sobre o evento da torre inclinada:

Foi Galileu, o mais importante cientista do século dezessete, quem deu prestígio à opinião de Copérnico sobre o movimento da Terra. Fez isso desacreditando as ideias de Aristóteles sobre o movimento. Embora não fosse o primeiro a apontar dificuldades nas concepções de Aristóteles, Galileu foi o primeiro a fornecer uma refutação definitiva delas através da observação e dos experimentos.

Galileu demoliu facilmente a hipótese de Aristóteles sobre a queda dos corpos. Conta-se que Galileu deixou cair da torre inclinada de Pisa vários objetos com pesos diferentes e comparou suas quedas. Ao contrário da afirmativa de Aristóteles, Galileu comprovou que uma pedra duas vezes mais pesada que outra não caía realmente duas vezes mais rápido. Exceto pelo pequeno efeito da resistência do ar, ele descobriu que objetos de vários pesos, soltos ao mesmo tempo, caíam juntos e atingiam o chão ao mesmo tempo. Em certa ocasião, Galileu presumivelmente teria atraído uma grande multidão para testemunhar a queda de dois objetos com pesos diferentes do topo da torre. A lenda conta que muitos observadores desta demonstração que viram os objetos baterem juntos no chão zombaram do jovem Galileu e continuaram a sustentar os ensinamentos de Aristóteles (HEWITT, 2015, p. 49, grifo nosso).

Apesar desse livro de Paul Hewitt ter sido reeditado e traduzido para várias línguas, tanto a primeira edição publicada em 1971 quanto a atual 12ª edição de 2015 apresentam essas curiosidades acerca de experimento na Torre de Pisa. Hewitt (2015) inicialmente fez uma saudação à figura de Galileu, como cientista mais importante do século XVII. Logo em seguida, relatou que Galileu “foi o primeiro a fornecer uma refutação definitiva” das ideias do movimento de Aristóteles “através da observação e dos experimentos”. Como já escrevemos, através de Mariconda (2006a), vimos que a ciência estudada nas academias na época de Galileu privilegiava a teoria aristotélica e colocava a técnica ou a experiência em segundo plano, isto é, havia um desprezo da técnica pelos professores peripatéticos.

No outro parágrafo, Hewitt (2015) segue a dizer que Galileu “demoliu facilmente” as ideias de Aristóteles sobre o movimento dos corpos. Pela leitura de Hessen (1993) a teoria dos movimentos vista como “verdade” pelos peripatéticos era a teoria de Aristóteles, tudo o que fosse contrário à interpretação aristotélica dos fenômenos naturais não recebia crédito perante o corpo docente das universidades. “Demoliu facilmente” poderia ser um termo válido na compreensão moderna de ciência que temos atualmente, mas de maneira alguma foi “fácil”

para Galileu convencer seus pares sobre a nova interpretação que ele tinha para o fenômeno da queda dos corpos.

Mesmo com o passar dos anos, o autor ainda não fez nenhuma correção acerca desse texto, pois este se encontra irretocável tanto na 9ª quanto na 12ª edições, que foram as edições que analisamos, além da primeira edição.

Podemos citar outro exemplo da lenda do experimento da Torre de Pisa, desta vez em Lederman (1993). Leon Lederman foi um físico experimental de reputação internacional, laureado com Nobel de física em 1988, que aceitou a lenda da Torre de Pisa como um evento midiático:

A proeza na Torre Inclinada de Pisa foi dirigida a esse grupo [aristotélicos]. Hawking está certo de que não teria sido uma experiência ideal. Mas foi um evento. E, como em qualquer evento encenado, Galileu sabia de antemão como isso ia sair. Posso vê-lo subindo a torre na escuridão total às três da manhã e jogando um par de bolas de chumbo para seus assistentes de pós-doc. “Você deve sentir as duas bolas batendo na sua cabeça ao mesmo tempo”, ele grita para seu assistente. “Grite se a bola maior bater primeiro em você.” Mas ele realmente não precisava fazer isso, porque ele já havia raciocinado que as duas bolas deveriam atingir o chão no mesmo instante (LEDERMAN, 1993, p. 73-74).

Lederman (1993) ressaltou em dizer que Galileu já sabia o resultado da queda das duas bolas antes mesmo de realizar essa experiência, porém cita como verdadeira a lenda da queda dos corpos na Torre de Pisa. Curioso que a seção intitulada desse capítulo é, tradução nossa, “A verdade da Torre” (*The Truth of the Tower*), demonstrando a aceitação do evento na Torre de Pisa.

Persistindo em mais exemplos sobre a lendária história do experimento da Torre de Pisa, mas dessa vez analisando um exemplo mais antigo:

Membros da Universidade de Pisa, e outros espectadores, estão reunidos no espaço ao pé da maravilhosa torre inclinada de mármore branco naquela cidade em uma manhã no ano de 1591. Um jovem professor [Galileu] sobe a escada em espiral até chegar à galeria superando a sétima fileira de arcos. As pessoas abaixo o observam enquanto ele equilibra duas bolas na borda da galeria, uma pesando cem vezes mais que a outra. As bolas são liberadas no mesmo instante, e são mantidas juntas quando caem no ar até que se ouve atingirem o chão no mesmo instante. A natureza prova sem sombras de dúvidas e dá uma resposta imediata a uma questão debatida por dois mil anos.

“Esse homem intrometido, Galileu, deve ser suprimido”, murmuraram os pais da universidade ao saírem da praça. “Ele acha que, ao nos mostrar que uma bola pesada e uma leve caindo simultaneamente no chão, pode abalar nossa crença na filosofia que ensina que uma bola pesando cem libras cairia cem vezes mais rápido que uma pesando uma libra? Esse desrespeito pela autoridade é perigoso e veremos que ela não vai mais longe”. Assim, eles voltaram para seus livros para explicar a evidência de seus sentidos; e

odiavam o homem que perturbara suas serenidades filosóficas. Para colocar a crença à prova do experimento, e fundamentar as conclusões após a observação, a recompensa de Galileu em sua velhice foi à prisão pela Inquisição, e um coração partido. É assim que um novo método científico é reconhecido pelos guardiões da doutrina tradicional (GREGORY, 1917, p. 2-3, grifo nosso).

Neste texto de 1917, Sir Richard Gregory credita um caráter infalível ao experimento aplicado na época de Galileu, como se o simples ato de soltar duas bolas de cima da torre (sem contar que seria um esforço hercúleo acreditar que uma pessoa conseguisse levar uma bola de cem libras até o alto de uma torre) oferecesse uma prova definitiva respondida pela natureza.

Como Paul Hewitt e Leon Lederman, brilhantes profissionais nas suas respectivas áreas da física, continuaram a reproduzir essas histórias sem um determinado escrutínio histórico da ciência? Como vimos anteriormente, tanto um século atrás, como nos dias de hoje, ainda se tem exemplos equivocados sobre o suposto evento na Torre de Pisa. Deixa claro, então, que é pertinente analisarmos as obras originais que mencionam o experimento da Torre de Pisa.

Uma das mais famosas narrativas dessa história da ciência conta que Galileu, em 1590, subiu ao topo da Torre Inclinada de Pisa, e lá do alto soltou dois objetos de pesos diferentes, com a finalidade de contestar a lei da queda de Aristóteles, lei esta que afirmava que a velocidade de queda dos corpos é proporcional ao seu peso. Com esta exposição do alto da Torre Inclinada, Galileu demonstrou aos professores e alunos reunidos em volta da torre que Aristóteles estava errado.

De acordo com Segre (1989), esta história deve ter pouca importância para a ciência ou para a história da ciência, pois o experimento não teve impacto no pensamento de Galileu; se realmente ocorresse, teria sido apenas uma exibição pública e Galileu não teria subido ao topo da torre sem conhecer o resultado antecipadamente.

Entretanto, a demonstração do evento da Torre de Pisa tem sido frequentemente considerada como uma reviravolta na história da ciência, e muitos autores que acreditam que a ciência de Galileu era principalmente empírica a reproduziram como um exemplo clássico da superioridade da ciência empírica sobre a ciência a priori. Mesmo apesar do fato de que a história da Torre de Pisa nunca foi mencionada em quaisquer escritos de Galileu e nem há evidência de que ele tenha narrado essa história. A história da Torre de Pisa foi descrita 12 anos após a morte de Galileu por Vincenzo Viviani (1622-1703), um de seus mais próximos

alunos e colaboradores, como parte de uma biografia de Galileu escrita em 1654 e inicialmente publicada postumamente em 1717 (SEGRE, 1989).

A partir do final do século XIX, historiadores da ciência começaram a interpretar que Viviani distorcera a imagem de Galileu, inclusive a suposta história da Torre de Pisa, e que sua biografia sobre Galileu não correspondia com veracidade às finalidades da história moderna da ciência. A lenda do experimento da Torre de Pisa tornou-se famosa depois de 1935, quando Lane Cooper (1875-1959) professor de língua e literatura inglesa da Universidade de Cornell nos EUA, escreveu seu famoso livro “*Aristotle, Galileo and the Tower of Pisa*” mostrando como a história de Viviani não era apoiada por evidências históricas e eram histórias fictícias, inventadas (SEGRE, 1989).

A história sobre Galileu e a Torre Inclinada de Pisa apareceu pela primeira vez em uma biografia de Galileu escrita por Vincenzo Viviani, o primeiro biógrafo de Galileu que o serviu em seus últimos anos de cegueira e prisão domiciliar, de 1639 até a morte de Galileu em 1642. Viviani, como já dissemos, redigiu sua biografia em 1654 (embora não tenha sido publicado até 1717), descreveu eventos que supostamente ocorreram seis décadas antes, mas que ele mesmo não testemunhou:

Naquele tempo (1589-1590), ele [Galileu] estava convencido de que a investigação dos efeitos da natureza exige necessariamente um conhecimento verdadeiro da natureza do movimento, de acordo com o axioma ao mesmo tempo filosófico e conhecido *ignorato motu ignoratur natura* [a ignorância do movimento significa a ignorância da natureza]. Foi então que, para grande indignação de todos os filósofos, ele demonstrou - com o auxílio de experiências, provas e raciocínios exatos - a falsidade de numerosíssimas conclusões de Aristóteles sobre a natureza do movimento, conclusões que, até então, eram tidas como perfeitamente claras e indubitáveis. Assim, entre outras, a de que as velocidades de móveis da mesma matéria, mas desigualmente pesados e movendo-se através do mesmo meio, não obedecem a proporção de seus pesos, como é declarado por Aristóteles, mas se movem, todos, com a mesma velocidade. O que demonstrou em repetidas experiências, feitas no alto do campanário de Pisa, na presença de todos os outros professores e filósofos e de toda a Universidade. [Demonstrou também] que as velocidades de um mesmo móvel que cai, atravessando diferentes meios, não obedecem tampouco a proporção inversa da densidade desses meios, deduzindo-o a partir de consequências manifestamente absurdas e contrárias à experiência sensível. (VIVIANI, apud COOPER, 1935, p. 26)¹.

¹ Esse trecho de Viviani foi traduzido também pelo importante filósofo da ciência Alexandre Koyrè (1982 [1937], p. 200-201) que defendia um Galileu “platônico”, quer dizer, que o cientista italiano jamais tivera feito os experimentos, que os feitos de Galileu ficaram restritos à física-matemática. Já outro importante nome que trabalhou com esse mesmo texto de Viviani, o historiador da ciência Stillman Drake defendia uma visão mais experimentalista de Galileu, como pode ser visto em Drake (1978, p. 19-20). Queremos destacar que o mesmo texto de Viviani foi traduzido por renomados especialistas, mas com diferentes visões às descobertas de Galileu.

Em 1937, Alexandre Koyré, matemático, filósofo e historiador da ciência, escreveu que os afamados experimentos da Torre de Pisa jamais foram feitos por Galileu: “o próprio relato de Viviani sobre a experiência de Pisa não se baseia em coisa alguma. As experiências de Pisa são um mito” (KOYRE, 1982, p. 200, grifo nosso).

O registro do experimento da Torre de Pisa feito por Galileu consta apenas nos registros de Viviani, não há relatos, por exemplo, como seria de esperar para um acontecimento público dessa importância, registros oficiais da Universidade de Pisa (MARICONDA e VASCONCELOS, 2006b). Vincenzo Renieri, discípulo de Galileu, professor de matemática em Pisa, escreveu uma carta a Galileu afirmando que ele (Renieri) realizara experimentos soltando objetos da Torre de Pisa e pediu a Galileu que os interpretasse. Renieri escreveu:

Aqui tivemos ocasião de fazer um experimento de dois pesos caindo de uma altura, de material diverso, ou seja, de madeira e um de chumbo, mas do mesmo tamanho; porque um certo jesuíta [Niccolò Cabeo] escreveu que eles descem ao mesmo tempo e com igual velocidade alcançam a Terra; e certo inglês afirma que Liceti aqui estabeleceu um problema e deu a explicação disso. Mas finalmente encontramos o fato pelo contrário, porque do cume do Campanário da Catedral [em Pisa], entre a bola de chumbo e a bola de madeira, ocorrem pelo menos três côvados de diferença. Experimentos também foram feitos com duas bolas de chumbo, uma do tamanho igual a uma bala de canhão e a outra do tamanho de uma bala de mosquete, e viu-se que, quando a maior e a menor caem da altura desse mesmo campanário, a maior precede a pequena de um palmo. (RENIERI, apud COOPER, 1935, p. 31)².

Nem todas as cartas da correspondência entre Renieri e Galileu foram preservadas, mas aquelas que existem não mostram evidências de que Galileu tenha realizado o experimento por si mesmo. Galileu já tinha discutido o assunto da queda dos corpos em seu trabalho sobre as *Duas Novas Ciências*. Mas, na verdade, Galileu não se referia a nenhuma torre específica e discutiu apenas experimentos mentais (SEGRE, 1989).

Já foi visto que há dúvidas consideráveis de que Galileu tenha realizado o experimento da Torre de Pisa (COOPER, 1935). Outra dificuldade é que, se Galileu tivesse realmente feito o experimento, os resultados teriam sido bastante confusos. Casper (1977) encenou o experimento da Torre de Pisa utilizando uma bola de softball e um projétil de 7 kg que foram soltos simultaneamente de uma altura de cerca de 60 m. O projétil atingiu o solo de 6 a 9 m à frente da bola de softball.

Pela visão de Franklin (1979), se Galileu realmente tivesse feito o experimento, o resultado estaria em desacordo com a previsão aristotélica, de que a velocidade da queda era

² Essa citação também foi analisada por Koyré (1982, p. 203) e por Drake (1978, p. 414).

proporcional ao peso do objeto, e da previsão do próprio Galileu, de que os objetos caem em taxas idênticas, independentemente do seu peso. Este resultado certamente teria colocado problemas para qualquer teoria então existente.

Tanto para Koyre (1982) quanto para Segre (1989), certamente Galileu não fez o experimento da Torre de Pisa. Entretanto cabe explicar uma pergunta feita por Segre (1989): “*Por que Viviani achava importante relatar esse experimento?*”.

Segundo Segre (1989), Viviani escrevia durante uma época em que uma biografia tinha que seguir certos padrões, como os adotados por Giorgio Vasari (1511-1574), o pintor e arquiteto maneirista que escreveu o *Vite*, a mais famosa coleção de biografias da história da arte. Um dos elementos recorrentes nesse estilo de biografia é o embelezamento da imagem do artista por meio de anedotas, muitas vezes inventadas. O importante, então, era embelezar a imagem de Galileu, mesmo que por meio de histórias inventadas. Mas até mesmo esse embelezamento estava sujeito a certas regras, ditadas pelos gostos do público de Viviani. Um público geral educado, muitos da nobreza, do clero e das universidades. Esse público preferia ouvir sobre coisas físicas práticas, em vez de questões matemáticas abstratas. Um bom exemplo desse acontecimento é a carta de 1642 de congratulações que Cavalieri fez a Torricelli, ambos seguidores de Galileu, pela admissão na Academia della Crusca, que além das congratulações, Cavalieri deu conselhos e mencionou as expectativas dos membros dessa academia:

Eu ouvi dizer que eles esperam coisas físicas, e não matemáticas, e talvez eles estejam certos, pois os primeiros assemelham-se mais ao joio [crusca], enquanto o segundo é a farinha - a verdadeira comida e nutrição do intelecto. É aconselhável atender a expectativa deles e, mais do que isso, a expectativa do público em geral que tem pouca estima pela matemática, a menos que veja algumas aplicações (SEGRE, 1989, p. 447).

Assim, tanto Torricelli e quanto Viviani tiveram que se adaptar a essas expectativas e tentar apresentar uma imagem da ciência tão prática e “tangível” quanto possível. E uma descrição como a experiência da Torre de Pisa, verdadeira ou não, era exatamente o que o público de Viviani gostaria de ouvir (SEGRE, 1989). A história do experimento da Torre de Pisa é falsa, mas o intuito desse relato feito por Viviani era provar algo maior, era refutar Aristóteles, em particular afirmação aristotélica de que a velocidade de queda de um corpo é proporcional a seu peso, ou seja, quanto mais pesado, maior a velocidade de queda. Ora, é de se admitir que não há como negar que, se alguém fizer tal experimento, chegará inevitavelmente à conclusão de que a suposição aristotélica é falsa. E por outro lado, hoje em dia já é trivial fazer ensaios de queda de objetos no vácuo.

Viviani, ao descrever a história da Torre de Pisa, não estava escrevendo como cientista ou como historiador da ciência, mas como um escritor, dirigindo-se a um público interessado em literatura. Ele deve ser elogiado por ter conseguido produzir tal prosa, com tanta verdade nela. E, como Lane Cooper deixou claro em sua obra, ele é provavelmente mais confiável como historiador da ciência do que muitos historiadores modernos da ciência que amplificaram o que ele escreveu. Assim como é importante reconhecermos o experimento da Torre de Pisa como mito e não como fato histórico, para não sermos convencidos por argumentos de autoridades no assunto, também é válido de se levar em consideração o contexto literário que vivia Viviani ao se escrever essa lenda (SEGRE, 1989). Vale lembrar que o sucesso dessa lenda ser contada há mais de 300 anos, pode ser creditado à prosa de Viviani ao confrontar a complexidade de mundos científicos diferentes, como os aristotélicos e galileanos, que se confrontaram além da ciência, em um experimento aparentemente muito simples visto a olho nu.

A.3 CONTEÚDO DE FÍSICA PRESENTE NAS DUAS NOVAS CIÊNCIAS

Os *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze* (*Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas Novas Ciências*), tratado daqui em diante como *Duas Novas Ciências*, escrito por Galileu Galilei (1564-1642) e publicado em 1638, foi um marco na história da ciência. Essa obra marcou o nascimento da Ciência Física nos moldes modernos. Galileu interpretou as duas novas ciências, a resistência dos materiais e o movimento dos corpos, utilizando a geometria aliada com a experimentação, sem a necessidade de conciliar suas pesquisas com a doutrina aristotélica defendida pela Igreja.

A obra *Duas Novas Ciências* foi escrita na forma de diálogos, Galileu utilizava essa forma de escrita platônica muito difundida no Renascimento. Esse recurso dialógico facilitou a retórica de Galileu para discutir nesta obra os principais pontos de discordância com a física aristotélica tradicional.

Os três personagens de outra importante obra de Galileu, *Dialogo sopra i Due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano* (*Diálogo sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano*), publicada em 1632, são os mesmos das *Duas Novas Ciências*. São, praticamente, personagens reais. O primeiro deles, Felipe Salviati (1582-1614), nobre florentino, foi amigo íntimo de Galileu. Giovanfrancesco Sagredo (1571-1620), também seu amigo, era um diplomata que tinha grande interesse às questões científicas

da época. Simplicio, o terceiro interlocutor, foi um filósofo grego neoplatônico do século VI d.C, também conhecido como um dos mais importantes comentadores de Aristóteles (MARICONDA, 1988).

Esses três personagens, embora sejam os mesmos do *Diálogo*, apresentam diferentes discursos entre os interlocutores do *Diálogo* e das *Duas Novas Ciências*. No *Diálogo*, Salviati representa o novo cientista que combina intuição e experimentação com apurado conhecimento matemático. Salviati retrata, assim, o próprio Galileu, em seus diálogos e a maneira de filosofar. Sagredo representa o homem prático que faz uso da nova ciência para tornar suas ações mais eficazes, tanto no progresso material, quanto no espiritual. Sagredo simboliza a mentalidade progressista e não-dogmática nascida do Renascimento. Ele tem o papel de árbitro entre as posições de Salviati e Simplicio. Porém, nem sempre se apresenta imparcial, pois mostra entusiasmo pelas novas ideias. Simplicio serve a dois propósitos: ele é uma referência a Aristóteles, sua Filosofia e sua Física; e também simboliza os professores peripatéticos dogmáticos que tinham o controle do ensino oficial. Simplicio representa tanto a tradição quanto o dogmatismo. Tradição no sentido da complexidade da cosmologia aristotélico-ptolomaica e dogmatismo no sentido de enrijecer o pensamento ao buscar novas evidências que possam ser conciliadas à filosofia de Aristóteles (MARICONDA, 1988).

Nas *Duas Novas Ciências*, Galileu não é representado somente por Salviati, que ao ler o texto de Galileu, começa a expressar posições e dúvidas próprias. Sagredo também retrata Galileu em muitas questões levantadas e que não são respondidas por Salviati. No entanto, a mudança de Simplicio é mais evidente: ele não defende mais as velhas teorias, mesmo continuando a ser um peripatético; geralmente, ele é convencido por Salviati. Isto traduz o objetivo das *Duas Novas Ciências*, que é somente a exposição de duas novas ciências e não o debate sobre questões tradicionais como no *Diálogo*. Diante da novidade, Simplicio apresenta agora ingenuidade do senso comum. Entretanto, quando encontra dificuldade em entender as demonstrações matemáticas do tratado sobre o movimento, chega a queixar-se de não ter estudado Geometria antes de aplicar-se à Filosofia (MARICONDA, 1988).

O conteúdo das *Duas Novas Ciências* foi composto originalmente por quatro jornadas. A seguir trataremos de cada uma com mais detalhes.

A primeira jornada pode ser dividida em duas partes e é considerada como uma introdução às duas novas ciências que serão aprofundadas nas próximas jornadas. Na primeira parte, Galileu trata de questões a respeito da resistência dos materiais. Galileu aplica seu conhecimento sobre geometria para explicar o paradoxo de que a resistência das partes de uma máquina tende a diminuir ao invés de aumentar ou conservar-se, quando ampliada suas

dimensões. Galileu também trata da estrutura da matéria, principalmente dos fatores que mantêm os sólidos coesos. Na segunda parte, Galileu explica o movimento do pêndulo e a queda livre de corpos utilizando novamente a geometria para estudar o movimento uniformemente acelerado. Seu empenho é de aplicar a física-geométrica como método de explicação dos problemas práticos.

A segunda jornada trata da primeira nova ciência enunciada no título da obra, a resistência dos materiais nos problemas relacionados à Estática. A importância dessa jornada pode ser reconhecida pela perspectiva metodológica, pois com base no princípio da alavanca de Arquimedes, Galileu utiliza a matemática para um problema físico.

A terceira e quarta jornadas tratam da segunda nova ciência: a Dinâmica. Na terceira jornada, Galileu utiliza a geometria para analisar as teorias do movimento uniforme e do movimento uniformemente acelerado. Galileu usa desse recurso matemático para explicar o movimento da queda dos corpos. Em seguida, constrói um plano inclinado e um pêndulo, para provar sua hipótese de que o movimento de um corpo é caracterizado pelas leis geométricas do movimento uniformemente acelerado.

Na quarta jornada, Galileu emprega as leis do movimento na trajetória parabólica do movimento dos projéteis, desenvolvendo esse tipo de movimento em dois, como composto por um movimento uniforme na horizontal e por um movimento uniformemente acelerado na vertical.

Podemos mencionar que as *Duas Novas Ciências* mostram que Galileu foi o primeiro físico no sentido moderno, pois foi o primeiro a compreender que as ideias copernicanas não se limitavam apenas às evidências astronômicas, mas também se aplicavam às leis da Mecânica. Galileu, portanto, buscava construir uma física unificada em que as leis do movimento seriam universais atendendo tanto à astronomia quanto à Mecânica (MARICONDA, 1988).

Como já foi dito, as *Duas Novas Ciências* foi uma obra muito importante para o nascimento da física nos moldes modernos. Partindo da ideia galileana de união da teoria com a técnica, utilizamos alguns pontos-chave para o andamento do nosso trabalho com os estudantes presentes nas *Duas Novas Ciências*, que podem ser relacionados ao lendário experimento da Torre de Pisa:

- O experimento mental das pedras conjugadas;
- Espaço percorrido proporcional aos quadrados dos tempos;
- Espaços percorridos em tempos iguais estão entre si como a série de números ímpares;

- A velocidade é proporcional ao tempo no movimento uniformemente acelerado.

Galileu utilizava experimentos mentais para explicar determinado fenômeno natural. Na primeira jornada das *Duas Novas Ciências*, Galileu elabora um experimento mental da queda de duas pedras de diferentes pesos unidas a uma corda, que pode ser relacionado ao experimento mítico da Torre de Pisa. Suponhamos que duas pedras, uma bem mais pesada que a outra, soltas da mesma altura, caem do alto da Torre de Pisa. Há apenas três possibilidades para descrever a queda dessas pedras. A pedra mais pesada cai mais rapidamente que a pedra leve, a pedra mais leve cai mais rapidamente do que a pesada, ou as duas pedras caem com a mesma velocidade. Pela física de Aristóteles, objetos pesados caem mais rapidamente que os leves na proporção de seus respectivos pesos. Agora, consideremos que as duas pedras caem do alto da Torre de Pisa, mas agora, são atadas a uma corda. Nessa analogia, podemos inferir que a pedra mais pesada cai puxando a mais leve e esta cai mais rapidamente se estivesse desamarrada. Quer dizer, com a pedra mais leve agindo como um paraquedas tendendo a retardar a pedra mais pesada. Desta maneira, o corpo conjugado a corda deve cair mais rapidamente que a pedra mais leve sozinha, e mais lentamente que a pedra mais pesada. Porém o corpo conjugado é certamente mais pesado do que a pedra pesada e, como consequência, deveria cair mais rápido do que a pedra pesada, segundo Aristóteles. Então, nesse experimento mental, Galileu colocou a física aristotélica em contradição lógica e solucionou esse quebra-cabeça nas *Duas Novas Ciências*:

Se verificarmos efetivamente que os móveis de diferentes pesos específicos diferem cada vez menos em velocidade à medida que os meios são cada vez menos resistentes e que, finalmente, embora extremamente desiguais em peso, no meio mais tênue, ainda que não vazio, a desigualdade das velocidades é pequeníssima e quase inobservável, parece-me que poderemos admitir, como conjectura altamente provável, que no vazio suas velocidades seriam totalmente iguais (GALILEI, 1988, p. 69, grifo nosso).

Galileu não fez o experimento da Torre de Pisa, pois sabia que a resistência do ar influenciaria no movimento da queda de objetos.

Na terceira jornada, Galileu trata do movimento uniforme e do movimento uniformemente acelerado. Já na primeira página da terceira jornada, Galileu faz uma introdução citando seus feitos em relação ao movimento. Desta jornada, trabalhamos com os estudantes a teoria da queda dos corpos, (1) utilizando a dependência que o espaço percorrido pelo corpo em queda tem em ser proporcional aos quadrados seus tempos, e (2) dos espaços percorridos em tempos iguais estar entre si como a série de números ímpares de um móvel em queda.

Vamos expor uma nova ciência a respeito de um tema muito antigo. Não existe na natureza nada anterior ao MOVIMENTO e, com referência a ele, não poucos e pequenos volumes foram escritos pelos filósofos; apesar disso muitas propriedades dignas de serem conhecidas não foram até o momento nem observadas, nem demonstradas. Observaram-se algumas mais simples, como, por exemplo, que o movimento natural dos graves em queda livre se acelera continuamente; porém, não foi demonstrada até o momento a proporção segundo a qual se produz sua aceleração. Também não foi demonstrado, que eu saiba, que um móvel, que cai a partir do repouso, percorre em tempos iguais espaços que mantêm entre si a mesma proporção que têm os números ímpares sucessivos a partir da unidade (GALILEI, 1988, p. 153).

Mais adiante nas *Duas Novas Ciências*, Galileu utiliza o teorema da velocidade escalar média v_m do movimento uniformemente acelerado para apresentar sua teoria de queda dos corpos:

O tempo no qual um espaço é percorrido por um corpo que parte do repouso uniformemente acelerado é igual ao tempo no qual esse mesmo espaço seria percorrido pelo mesmo corpo como velocidade constante, de valor igual à metade do maior e último valor alcançado no movimento uniformemente acelerado (GALILEI, 1988, p. 170).

Dessa maneira, podemos colocar em equação o que o Galileu disse. A velocidade escalar média desse corpo é igual à metade da velocidade final v nesse intervalo de tempo, ou seja,

$$v_m = \frac{v}{2} \quad (\text{A.2})$$

Uma vez que a velocidade média é definida como

$$v_m = \frac{d}{\Delta t} \quad (\text{A.3})$$

Sendo d a distância percorrida pelo corpo no tempo Δt , então a distância d e a velocidade final v podem ser relacionadas como:

$$d = \frac{v}{2} \Delta t \quad (\text{A.4})$$

Essa seria a mesma distância percorrida por um corpo no intervalo de tempo Δt , que se deslocasse em movimento retilíneo e uniforme com velocidade então constante igual a $\frac{v}{2}$.

Continuando nas *Duas Novas Ciências*, Galileu enuncia o Teorema II – Proposição II:

Se um móvel, partindo do repouso, cai com um movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados desses mesmos tempos (GALILEI, 1988, p.171).

Pelo teorema II, no movimento uniformemente variado, como a aceleração escalar é a mesma em todos os instantes, então seu valor coincide com a aceleração escalar média:

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (\text{A.5})$$

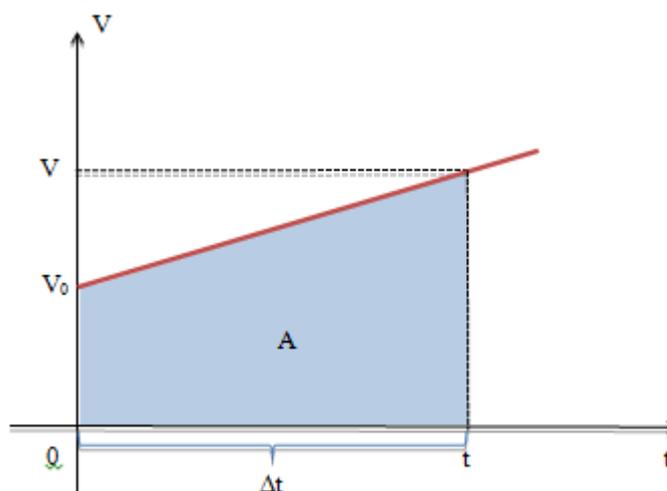
Em que Δv é a variação da velocidade diretamente proporcional ao intervalo de tempo Δt correspondente. Sendo v_0 a velocidade inicial, e v a velocidade num instante t , segue-se:

$$a_m = \frac{v - v_0}{t - 0} \quad (\text{A.6})$$

$$v = v_0 + at \quad (\text{A.7})$$

Para se provar que “os espaços percorridos estão numa proporção dupla, a saber, como os quadrados desses tempos” (GALILEI, 1988, p.171), podemos recorrer a partir do gráfico da velocidade do MUV da figura A.6, para obtermos a função horária do espaço.

Figura A.6 - Gráfico da velocidade do movimento uniformemente variado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como a velocidade é definida em termos da posição S do corpo, temos que:

$$v = \frac{dS}{dt} \quad (\text{A.8})$$

$$dS = v dt \quad (\text{A.9})$$

$$\int_{S_0}^S dS = \int_{t_0}^t v dt \quad (\text{A.10})$$

$$\Delta S = S - S_0 = \int_{t_0}^t v dt \quad (\text{A.11})$$

Nos mostra que a integral do lado direito da eq. (A.11) pode ser calculada a partir do gráfico v vs t .

A área do gráfico é um trapézio, assim calculamos:

$$\Delta S = \frac{(v_0+v)}{2} \cdot \Delta t \quad (\text{A.12})$$

Como $\Delta t = t - t_0 = t - 0$, então $\Delta t = t$. Substituindo $\Delta t = t$ e a eq. (A.7) na eq. (A.12), teremos:

$$\Delta S = \frac{(v_0+at+v_0)}{2} \cdot t \quad (\text{A.13})$$

$$\Delta S = v_0 \cdot t + \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad (\text{A.14})$$

A área do gráfico pode ser considerada numericamente igual ao espaço percorrido ($\Delta S = S - S_0$):

$$\Delta S = v_0 \cdot t + \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad (\text{A.15})$$

Considerando que o corpo em queda livre parte do repouso, então $v_0 = 0$ e a posição inicial $S_0 = 0$:

$$S = \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad (\text{A.16})$$

Galileu não descobriu o valor absoluto da aceleração da gravidade³, ele conseguiu chegar à proporção do espaço com o tempo que pode ser escrita desse modo:

$$S = k \cdot t^2 \quad (\text{A.17})$$

A incógnita k então seria uma constante, que como já vimos representa a aceleração dividida por dois.

Utilizando mais uma vez a figura A.6 pode-se demonstrar que a velocidade média no MUV, entre dois instantes, é igual à média aritmética das velocidades nos instantes considerados como já explicava Galileu nas *Duas Novas Ciências*. Sendo assim:

$$\Delta S = \frac{(v_0+v)}{2} \cdot \Delta t \quad (\text{A.18})$$

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{(v_0+v)}{2} \quad (\text{A.19})$$

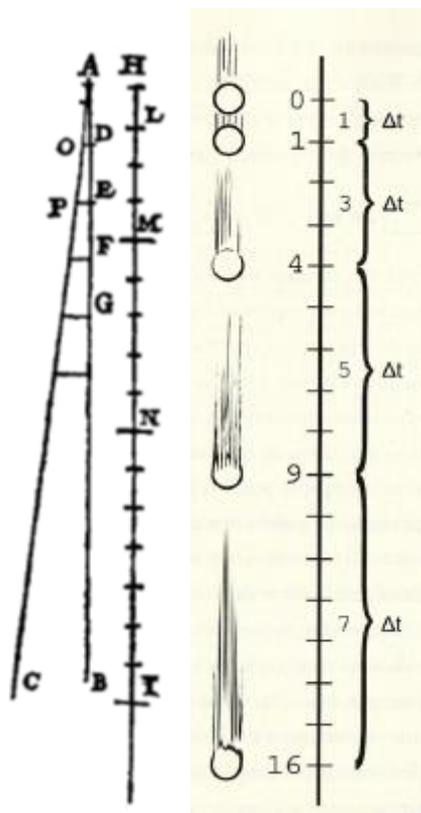
$$v_m = \frac{(v_0+v)}{2} \quad (\text{A.20})$$

Mais adiante nas *Duas Novas Ciências*, de acordo com a análise geométrica da figura A.7, Galileu exhibe que os espaços percorridos pelo móvel em movimento uniformemente acelerado estão em tempos iguais entre si como a série de números ímpares:

Daí segue-se, claramente, que se a partir do primeiro instante do movimento fossem tomados sucessivamente intervalos de tempos iguais, como por exemplo, AD, DE, EF, FG nos quais se percorrem os espaços HL, LM, MN, NI, estes espaços estariam entre si assim como os números ímpares a partir da unidade, a saber, 1, 3, 5, 7: esta é, com efeito, a proporção entre os excessos dos quadrados das linhas que se excedem igualmente, diferença essa que é igual à menor delas, ou seja, à proporção entre os quadrados dos números inteiros que se seguem à unidade. Quando, portanto, os graus de velocidade aumentam em tempos iguais, de acordo com a simples série dos números, os espaços percorridos em tempos iguais adquirem incrementos segundo a série dos números ímpares *ab unitate* (GALILEI, 1988, p.173).

³ Silveira (1995) destaca que foi Christian Huygens o primeiro a medir mais precisamente a aceleração gravitacional em 1659, 17 anos depois da morte de Galileu. Huygens encontrou o valor de aproximadamente de 9,5 m/s².

Figura A.7 - Representação da queda de um móvel. À esquerda mostra a representação geométrica de um móvel em queda feita por Galileu. A vertical AB representa o tempo decorrido. Os segmentos na horizontal ao longo do segmento AB representa a velocidade adquirida até o instante correspondente no eixo dos tempos AB. O segmento vertical HI representa os espaços percorridos durante os tempos AB. De HI está representado à série ímpar dos espaços percorridos. A figura à direita deixa mais evidente essa relação da série ímpar.



Fonte: GALILEI (1988, p. 171) na figura à esquerda. MARICONDA e VASCONCELOS (2006b, p. 224) na figura à direita.

Galileu, apesar de estabelecer corretamente que os espaços estão entre si como os quadrados dos tempos, e de que os espaços percorridos em tempos iguais estão entre si como a série dos números ímpares, também formula o princípio errôneo de que, em termos modernos, a velocidade é proporcional ao espaço percorrido. Galileu escreve essa lei da queda em 1604, numa carta a frei Paolo Sarpi, assim se expressa Galileu:

Muito Reverendíssimo Senhor e Padre Colendíssimo. Repensando acerca das coisas do movimento, nas quais, para demonstrar as propriedades por mim observadas, me faltava um princípio totalmente indubitável para poder pô-lo como axioma, cheguei a uma proposição que é muito natural e evidente, e, suposta esta, demonstro a seguir o resto, isto é, que os espaços percorridos pelo movimento natural estão em proporção ao quadrado dos tempos, e por consequência os espaços percorridos em tempos iguais estão como os números ímpares ab unitate, e as outras coisas. E o princípio é este: que o móvel natural cresce em velocidade com aquela proporção em que se afasta do início de seu movimento (FAVARO apud MARICONDA, 1988, p. XIII, grifo nosso).

Essa formulação incorreta será corrigida na terceira jornada das *Duas Novas Ciências*, como pode ser lido assim:

Vemos, portanto, com este simples cálculo [geométrico], que os espaços percorridos em tempos iguais por um móvel que, partindo do repouso, vai adquirindo velocidade proporcionalmente ao aumento do tempo, estão entre si como os números ímpares *ab unitate* 1, 3, 5, etc.; e, se tomamos no seu conjunto os espaços percorridos, podemos verificar que o espaço percorrido num tempo duplo é o quádruplo do percorrido no tempo simples, o espaço percorrido num tempo triplo é nove vezes o espaço percorrido no tempo simples, e, numa palavra, os espaços percorridos estão numa proporção dupla, a saber, como os quadrados desses tempos (GALILEI, 1988, p. 174, grifo nosso).

Galileu fez uma formulação moderna da lei de queda dos corpos e a comprovou por meio da experiência do plano inclinado que os espaços percorridos pelo corpo é proporcional aos quadrados dos tempos. Galileu, engenhosamente, utilizou o plano inclinado em uma maneira de “suavizar” a queda dos corpos devido à impossibilidade pelos recursos experimentais da época de se fazer medições de distância e tempo de queda de um objeto na vertical. Galileu além de ser um professor universitário de matemática também tinha uma vasta habilidade em manipular equipamentos para realizar medidas. Foi dessa união entre a ciência e a técnica que contribuiu para uma ruptura com a ciência aristotélica.

A.4 O APARATO EXPERIMENTAL DE QUEDA VERTICAL

Fizemos o aparato experimental de queda vertical para trabalharmos com os estudantes o lendário experimento da Torre de Pisa e comprovarmos algumas contribuições de Galileu expostas no livro *Duas Novas Ciências*, tais como:

- O experimento mental das pedras conjugadas;
- Espaço percorrido proporcional aos quadrados dos tempos;
- Espaços percorridos em tempos iguais estão entre si como a série de números ímpares;
- Velocidade proporcional ao tempo decorrido;
- A influência da resistência do ar na queda vertical.

Para o movimento de queda vertical, fizemos o aparato semelhantemente ao produzido por empresas do ramo de laboratório de ensino, como, por exemplo, o sensor de movimento da PASCO⁴, empresa bem conhecida entre os professores de física. A vantagem do nosso aparato é que este é bem mais barato e tão confiável quanto os sensores de ultrassom dessas empresas. O sensor de movimento ultrassônico foi construído semelhantemente ao sugerido por Galeriu et al. (2014). Este utilizou o mesmo sensor ultrassônico HC-SR04 juntamente com um Arduino UNO para se dedicar ao ensino do movimento harmônico simples com seus estudantes de ensino médio. Nesse trabalho, usamos o sensor para medir distâncias na vertical.

Para construir esse aparato foram necessários alguns materiais de fácil obtenção. A lista de materiais está logo abaixo na figura A.8. Os itens de 1 a 7 podem ser encontrados em lojas de componentes eletrônicos sem grandes dificuldades. Na caixinha do sensor ultrassônico (4) foi feito dois furos para entrada do sensor. A placa de acrílico (8) foi confeccionada em lojas especializadas no tamanho especificado. Os itens de 10 a 15 são produtos comerciais encontrados em empresas do ramo. O valor total para confeccionar o aparato ficou em torno de 130 reais. Na lista de materiais está indicado o preço da maioria dos componentes.

O aparato experimental é relativamente fácil de montar e de transportar, sendo seu uso acessível seja em uma bancada de laboratório ou mesmo sobre uma carteira comum de sala de aula.

⁴ O sensor de movimento da empresa citada pode ser encontrado no endereço eletrônico https://www.pasco.com/prodCatalog/PS/PS-2103_pasport-motion-sensor/index.cfm. Acessado em 20 de novembro de 2018. Esse equipamento da PASCO tem um preço de 1700 reais atualmente.

Figura A.8 - Lista de materiais com o preço médio especificado. Os produtos sem preço são de valor irrisório.

Nº	Nome do produto	Quantidade e preço	Figura
1	Arduino UNO	1 (R\$ 45,00)	
2	Sensor Ultrassônico HC-SR04	1 (R\$ 8,00)	
3	Sensor de temperatura DS18B20	1 (R\$ 8,00)	
4	Caixinha para o HC-SR04 (85x40x70mm)	1 (R\$ 5,00)	
5	Cabos de conexão macho- fêmea	4	
6	Cabo USB 2.0 (cabo de impressora)	1 (já vem com Arduino)	
7	Espaçadores de placa de circuito impresso M3x10mm	5	
8	Placa de acrílico (20x10x4 mm)	1 (R\$ 5,00)	
9	Parafusos M3x10mm	10	

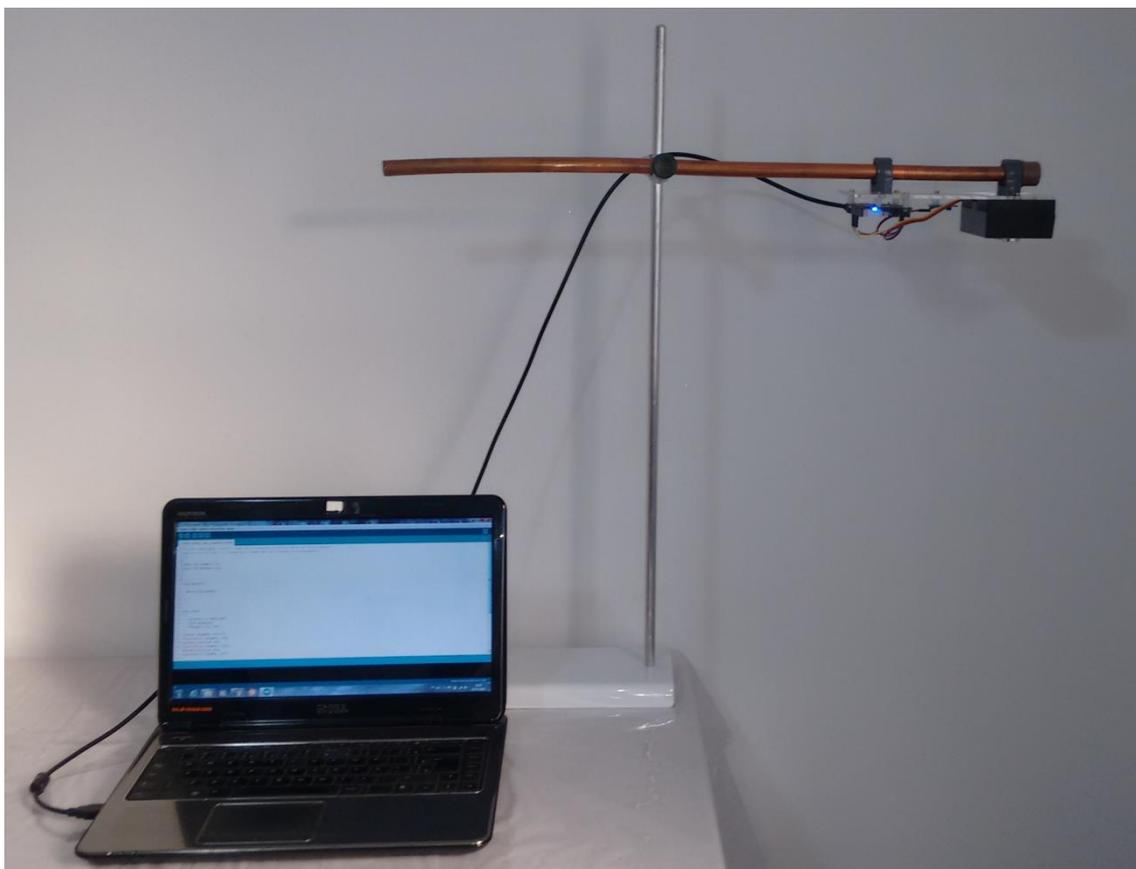
10	Suporte Universal	1 (R\$ 40,00)	
11	Mufa dupla	1 (R\$ 10,00)	
12	Tubo de cobre 5/8"	60 cm	
13	Abraçadeira para eletroduto de 20 mm	2	
14	Tubo pvc de 20 mm	2 pedaços de 10 mm	
15	Cap ("tampão") de 20 mm	1	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura A.9, tem-se o aparato experimental montado pronto para uso. O *notebook* já está com o programa instalado. A mufa dupla é usada para regular a altura do sensor ultrassônico no suporte universal. Utilizamos um tubo de cobre de 5/8 de polegada ao invés

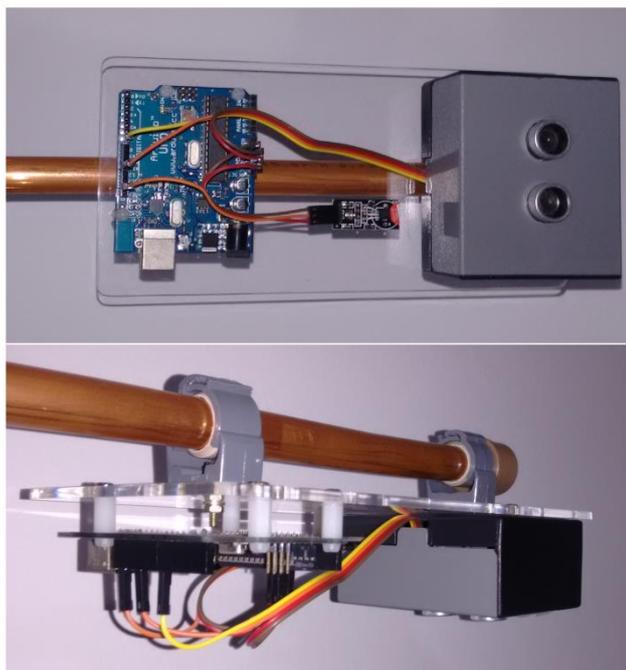
de um tubo de PVC de 20 mm, pois o encaixe da mufa dupla não é larga o bastante para encaixar um tubo de 20 mm de diâmetro. A mufa dupla é muito usada em experimentos em disciplinas de química e facilmente encontrado em lojas que vendem equipamentos para laboratório de ciências.

Figura A.9 - Aparato experimental ultrassônico pronto para uso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura A.10 conseguimos ver, na vista de cima, montados na placa de acrílico, o Arduino UNO; o sensor ultrassônico HC-SR04 com os módulos transmissor e receptor vistos na caixinha; e o sensor de temperatura DS18B20. Nota-se a pouca fixação desse aparato experimental, facilitando a montagem do circuito. Na vista de baixo da mesma figura, devemos observar o tubo de cobre envolvido pelos dois pedaços de tubo de PVC de 20 mm presos pelas duas abraçadeiras de eletroduto.

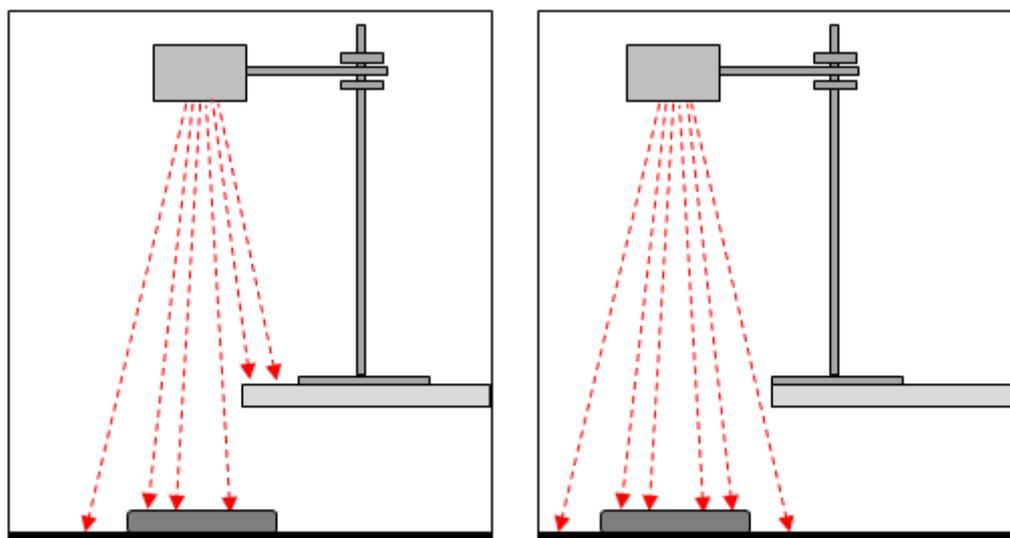
Figura A.10 - Perfis do aparato ultrassônico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os demais equipamentos desse aparato não exigem tanto cuidado no momento de fazer as medições da queda de objetos. Já o sensor ultrassônico requer maior atenção. Antes de realizarmos o experimento simulando a queda de objetos da Torre de Pisa, é importante ajustar o sensor ultrassônico.

As medições de queda dos corpos foram realizadas com o sensor virado para baixo sempre perpendicular ao chão. Utilizamos as recomendações de MacIsaac e Hämäläinen (2002) para testar o sensor ultrassônico, como a utilização de uma toalha no chão para absorver ondas refletidas indesejadas; e colocar o sensor ultrassônico um pouco afastado do *notebook* caso se note alguma diferença nas medições por causa de interferências de outras ondas de ultrassom do meio, como lâmpada fluorescente e do próprio *notebook*. A onda de ultrassom do sensor é mais bem refletida se o objeto estiver dentro de campo de 15° de abrangência do ultrassom, conforme o manual do fabricante, então é muito importante usar o sensor afastado de paredes, mesas ou quaisquer obstáculos que estejam no campo de medição do sensor, como é mostrado na figura A.11.

Figura A.11 - À esquerda, a superfície de trabalho está sendo detectada antes do alvo, então os dados serão imprecisos. Na parte à direita, a bancada não interfere no sinal, desse modo os dados estarão mais confiáveis.



Fonte - Elaborado pelo autor.

A função do sensor é medir o tempo da propagação do sinal ultrassônico que sai do transmissor e retorna ao receptor. Um transmissor que gera ondas ultrassônicas e um receptor que percebe o eco. Como a velocidade de propagação do sinal é conhecida, então o sensor pode ser usado para medir distâncias entre o sensor e um objeto que reflete a onda ultrassônica.

A velocidade do som é dependente da temperatura do meio, então é desejável levar em conta a temperatura ambiente na qual as medições serão feitas. A velocidade do som nos gases aumenta com o aumento da temperatura. Para ser capaz de se adaptar rapidamente à mudança da temperatura ambiente, é necessário adicionar um sensor de temperatura ao sistema de medição e usar os resultados de suas medições. Para isso usamos um sensor de temperatura (DS18B20) acoplado ao Arduino para medir a temperatura e corrigir o valor da velocidade do som por meio do programa. A equação que usamos da velocidade do som com a temperatura está descrita abaixo:

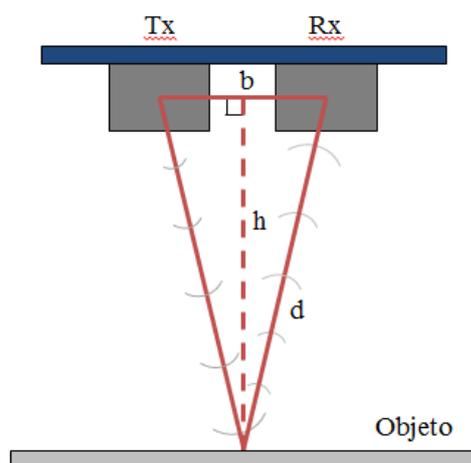
$$V = 331,0 + 0,6\Delta T, \text{ (Rossing, 2004)} \quad (\text{A.21})$$

onde ΔT é dado em celsius e a velocidade de 331,0 m/s é a velocidade do som a 0 °C no ar seco. Com um aumento da temperatura do ar de 1 °C, a velocidade do som aumenta em 0,6 m/s. Então para fazer análises com o sensor ultrassônico é imprescindível corrigir a

velocidade pela temperatura, do contrário os registros de posições de queda não serão confiáveis.

Outro modo necessário para corrigir as medições é levar em conta o caminho da propagação do sinal ultrassônico. Como o transmissor fica ao lado do receptor, do ponto de vista geométrico, para encontrar a altura (h) entre o sensor e o objeto, é necessário aplicar o teorema de Pitágoras no triângulo isósceles da figura A.12.

Figura A.12 - Representação da propagação da onda ultrassônica do sensor HC-SR04.

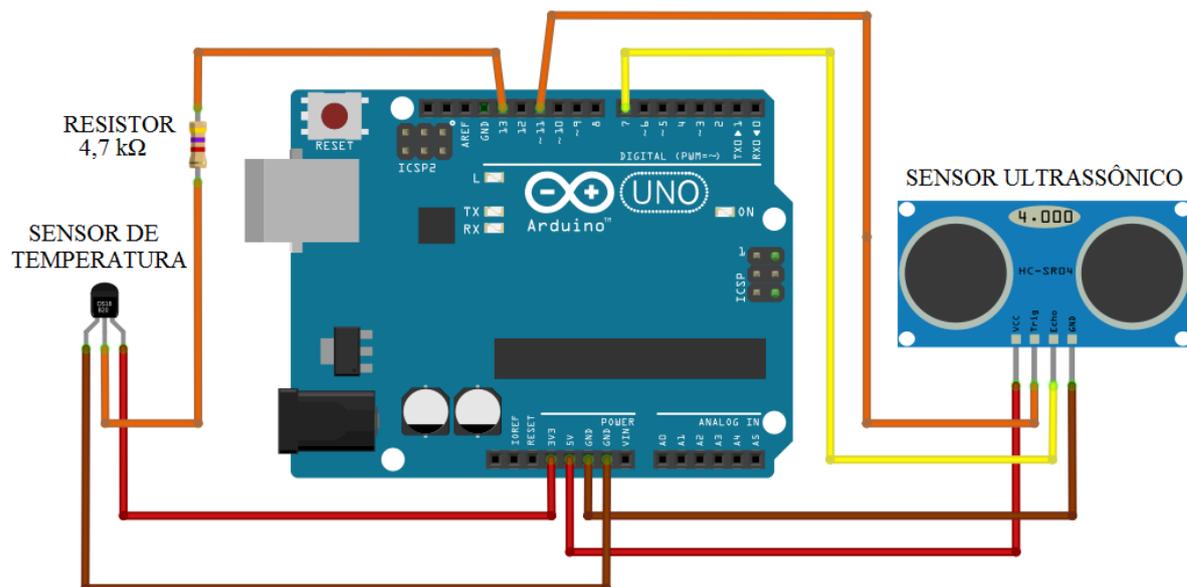


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta figura, h é altura entre o sensor e o objeto; b é a distância entre os centros do transmissor e do receptor do HC-SR04, que é de 2,6 cm; e d é a distância percorrida pela onda ultrassônica que sai do transmissor e chega ao receptor. Então para calcular a altura entre o sensor e o objeto, fizemos a triangulação desses valores:

$$h = \sqrt{(d^2 - 1,3^2)} \quad (\text{A.22})$$

A variável d é o registro feito primeiramente pelo sensor ultrassônico, sendo h a correção da altura. A montagem do circuito eletrônico encontra-se na figura A.13. O pino “echo” e o pino “trig” do HC-SR04 foram conectados aos pinos 7 e 11, respectivamente, do Arduino. O pino de sinal do sensor de temperatura (DS18B20), terminal intermediário, foi ligado no pino 13 do Arduino. As demais ligações são de alimentação.

Figura A.13 - Circuito eletrônico do aparato ultrassônico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O programa (*sketch*) encontra-se na figura A.14. Na posição quatro está a linha de programação que registra as posições e os tempos de queda do objeto em uma planilha chamada *serial monitor* do próprio programa do Arduino. Para encontrar boas medidas de altura entre o sensor e o objeto é necessário fazer ajustes na programação, como pode ser visto nas linhas 23 e 24 da figura 3.14. A linha 23 mostra a correção da velocidade de propagação da onda ultrassônica de acordo com a temperatura. Já a linha 24 mostra a correção da triangulação entre as distâncias que separam o transmissor de ultrassom (Tx) e o receptor de ultrassom (Rx) com o objeto. Colocamos um ciclo de medição de 20 ms no programa (linha 28) pois, na prática, foi o menor tempo que o sensor ultrassônico conseguiu registrar em uma altura de um metro.

Figura A.14 - Programa para medir distâncias e seus respectivos tempos de queda.

```
1 const int echoPin = 7;
2 const int trigPin = 11;
3 void setup(){
4   Serial.begin(9600);
5 }
6 void loop()
7 {
8   unsigned int echo_time;
9   float distance;
10  float distancel;
11  unsigned long time;
12
13  pinMode (trigPin, OUTPUT);
14  digitalWrite (trigPin, LOW);
15  delayMicroseconds (10);
16  digitalWrite (trigPin, HIGH);
17  delayMicroseconds (10);
18  digitalWrite (trigPin, LOW);
19
20  pinMode (echoPin, INPUT);
21  echo_time = pulseIn (echoPin, HIGH);
22  time = micros();
23  distance = (echo_time/2)*0.0346; //Vsom = (331.0 + 0.6 T) m/s, onde T é a temperatura em °C
24  distancel = sqrt(distance*distance - 1.3*1.3); // distância entre transmissor e receptor
25  Serial.print (time/1000000.0, 4);
26  Serial.print ("\t");
27  Serial.println(distancel, 2);
28  delay(20);
29 }
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após esses ajustes, realizamos medidas da queda de objetos, simulando o lendário experimento da Torre de Pisa. Foram feitas medidas de quedas de objetos em relação ao tempo, em uma altura de aproximadamente 1 metro do sensor até o chão, coletados pelo *serial monitor* do Arduino. Para o sensor registrar as posições do objeto, usamos embalagens de papelão (figura A.15), pois podemos enchê-las para ficarem mais pesadas e assim fazer outras medições com a finalidade de verificar com os estudantes que diferentes pesos produzem a mesma aceleração de queda.

Figura A.15 - Caixas de papelão utilizadas no experimento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela A.1 mostra os valores encontrados pela queda da embalagem de papelão registrados pelo *serial monitor*. O programa foi escrito para medir distâncias em centímetros e tempos corridos em segundos. Ao iniciar o programa, o Arduino começa a medir distâncias na taxa de 20 ms, sendo assim é adequado filtrar os valores de início e de fim da queda do móvel. Deixamos o corpo bem próximo ao sensor, cerca de 2 cm, e depois o soltamos até atingir o chão. Em seguida, selecionamos os valores da queda pelo *serial monitor* do Arduino.

Tabela A.1 - Medidas encontradas pelo sensor ultrassônico durante a queda do móvel.

Posição (cm)	Tempo corrido (s)
2,33 ± 0,30	12,9999 ± 0,0002
2,45 ± 0,30	13,0208 ± 0,0002
3,00 ± 0,30	13,0417 ± 0,0002
3,97 ± 0,30	13,0626 ± 0,0002
5,36 ± 0,30	13,0835 ± 0,0002
7,18 ± 0,30	13,1044 ± 0,0002
9,55 ± 0,30	13,1265 ± 0,0002
12,40 ± 0,30	13,1485 ± 0,0002
15,71 ± 0,30	13,1705 ± 0,0002
19,51 ± 0,30	13,1927 ± 0,0002
23,78 ± 0,30	13,2148 ± 0,0002
28,53 ± 0,30	13,2369 ± 0,0002
33,79 ± 0,30	13,2591 ± 0,0002
38,79 ± 0,30	13,2787 ± 0,0002
44,93 ± 0,30	13,3009 ± 0,0002
51,55 ± 0,30	13,3231 ± 0,0002
58,65 ± 0,30	13,3453 ± 0,0002
66,24 ± 0,30	13,3676 ± 0,0002
74,33 ± 0,30	13,3899 ± 0,0002
82,91 ± 0,30	13,4122 ± 0,0002
92,00 ± 0,30	13,4346 ± 0,0002

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o manual do sensor ultrassônico, este possui uma incerteza de tempo de 0,2 ms e de 3,0 mm nas distâncias. Comparamos as distâncias registradas pelo Arduino com uma trena nas distâncias de 2 cm até 10 cm (a cada 1 cm) e 10 cm até 1 metro (a cada 10 cm). Podemos dizer que as medidas de distâncias estão de acordo com a incerteza de 3,0 mm do manual do fabricante.

Galileu, nas *Duas Novas Ciências*, demonstrou geometricamente que no movimento uniformemente acelerado, os espaços percorridos são proporcionais aos quadrados dos tempos percorridos.

De acordo com Vuolo (1996), a incerteza padrão em k é, em primeira aproximação, dado por:

$$S = kt^2 \quad (\text{A.23})$$

$$k = \frac{S}{t^2} \quad (\text{A.24})$$

$$\Delta k^2 = \left(\frac{\partial k}{\partial S}\right)^2 \cdot \Delta S^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial t}\right)^2 \cdot \Delta t^2 \quad (\text{A.25})$$

$$\Delta k = \sqrt{\left(\frac{1}{t^4}\right) \cdot \Delta S^2 + \left(\frac{4S^2}{t^6}\right) \cdot \Delta t^2} \quad (\text{A.26})$$

Galileu repetia diversas vezes as medidas do experimento do plano inclinado para certificar da reprodutibilidade das medidas, como pode ser visto nas *Duas Novas Ciências*:

Por meio de experiências repetidas mais de cem vezes, sempre se encontrava que os espaços percorridos estavam entre si como os quadrados dos tempos e isso em todas as inclinações do plano, ou seja, da canaleta, pela qual se fazia descer a bola (GALILEI, 1988, p. 176, grifo nosso).

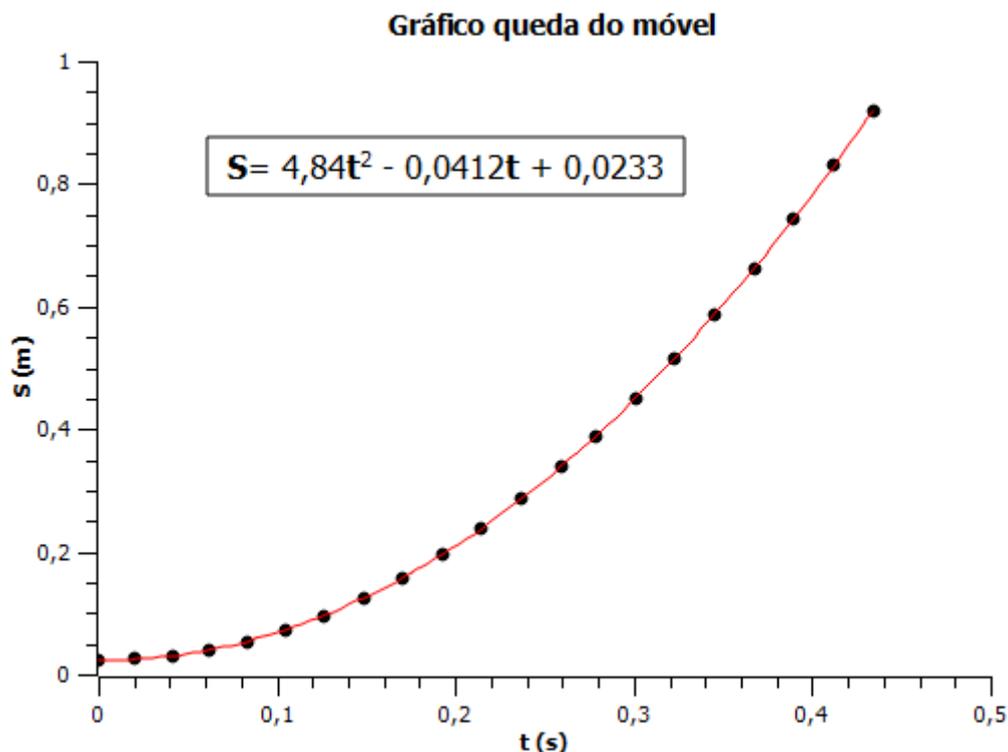
Pela eq. (A.26), consideramos as incertezas para acharmos a constante de proporcionalidade k , como pode ser visto na tabela A.2:

Tabela A.2 - Medidas de posições e intervalos de tempo do móvel registrado pelo sensor ultrassônico.

Posição (m)	Tempo (s)	k (m/s²)	Δk (m/s²)
0,023 \pm 0,003	0	-	-
0,025 \pm 0,003	0,0208 \pm 0,0002	56,575	7,012
0,030 \pm 0,003	0,0417 \pm 0,0002	17,277	1,736
0,040 \pm 0,003	0,0626 \pm 0,0002	10,140	0,769
0,054 \pm 0,003	0,0835 \pm 0,0002	7,688	0,432
0,073 \pm 0,003	0,1044 \pm 0,0002	6,582	0,276
0,096 \pm 0,003	0,1265 \pm 0,0002	5,973	0,189
0,124 \pm 0,003	0,1485 \pm 0,0002	5,622	0,137
0,157 \pm 0,003	0,1705 \pm 0,0002	5,402	0,104
0,195 \pm 0,003	0,1927 \pm 0,0002	5,256	0,082
0,238 \pm 0,003	0,2148 \pm 0,0002	5,156	0,066
0,285 \pm 0,003	0,2369 \pm 0,0002	5,083	0,054
0,338 \pm 0,003	0,2591 \pm 0,0002	5,032	0,045
0,388 \pm 0,003	0,2787 \pm 0,0002	4,994	0,039
0,449 \pm 0,003	0,3009 \pm 0,0002	4,963	0,034
0,516 \pm 0,003	0,3231 \pm 0,0002	4,938	0,029
0,587 \pm 0,003	0,3453 \pm 0,0002	4,918	0,026
0,662 \pm 0,003	0,3676 \pm 0,0002	4,902	0,023
0,743 \pm 0,003	0,3899 \pm 0,0002	4,890	0,020
0,829 \pm 0,003	0,4122 \pm 0,0002	4,879	0,018
0,920 \pm 0,003	0,4346 \pm 0,0002	4,871	0,017

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado apresentado na figura A.16 mostra o cálculo de $k = 4,84 \text{ m/s}^2$ utilizando o programa *Scydavis* disponível gratuitamente pela *internet*:

Figura A.16 - Curva da queda do objeto em uma altura de um metro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que k corresponde à proporção quadrática afirmada por Galileu nas *Duas Novas Ciências*. O que revela que a queda do objeto se trata de um movimento uniformemente acelerado.

Com o sensor ultrassônico devidamente ajustado, as medições foram satisfatórias. Vale destacar que o aparato experimental ultrassônico de queda vertical é muito prático de se montar, podendo ser montado rapidamente e usado dentro da sala de aula sem necessariamente ter a disponibilidade de um laboratório.

A.5 REFERENCIAL TEÓRICO

Realizamos um trabalho com os alunos utilizando alguns aspectos da atividade experimental juntamente com o contexto sócio-histórico do lendário experimento da Torre de Pisa. De todas as teorias pedagógicas que exploramos, a que mais correspondeu ao nosso trabalho foi a teoria histórico-cultural de Vigotski.

A obra de Vigotski aborda o processo do desenvolvimento infantil relacionando a cultura e as relações sociais no desenvolvimento do psiquismo da criança. O significado do

termo “cultura” na perspectiva vigotskiana pode ser entendido, segundo Pino (2000), de forma bem resumida, como a plenitude da produção humana, quer dizer, o domínio em relação à criação e a transformação do homem sobre a natureza.

A cultura origina formas especiais de conduta, modifica a atividade das funções psíquicas, edifica novos níveis no sistema do comportamento humano em desenvolvimento (VIGOTSKI, 1995, p.34).

Para Vigotski (1995), a cultura sobrepõe aos processos biológicos. A formação cultural é parte fundamental da constituição da natureza humana. A origem das funções psicológicas particularmente humanas é cultural e não biológica.

Vigotski utilizou o uso de instrumentos pelo ser humano como ferramenta ao conceito de atividade mediadora. A relação do ser humano com o mundo não é uma relação direta, mas uma relação mediada. O uso de instrumentos é um elemento mediador no desenvolvimento do ser humano.

A importância do uso de instrumentos pela atividade humana encontra alicerce nas ideias marxistas em relação ao trabalho. O homem transforma a natureza pelo trabalho, nessa transformação ocorre à união do homem e da natureza, e dessa relação cria-se a cultura e história humanas. Portanto, o trabalho é responsável pelo desenvolvimento das relações sociais, e a criação, uso e aperfeiçoamento de instrumentos. É no trabalho que o ser humano constrói aquilo que foi previamente estabelecido pela mente humana utilizando as diferentes manifestações da natureza, suas relações e modificações. Nesse processo de trabalho, como é esclarecido por Marx, além dos seres humanos transformarem a natureza, eles também transformam a si mesmos. Essa transformação pode ser entendida como esse exemplo dado por Duarte (2016):

O ser humano não criou a lança para desenvolver suas habilidades e fazer disputas de lançamento de dardos. Mas o uso da lança desenvolveu as habilidades humanas, o que, com o desenrolar histórico-social, acabou tornando-se um fim em si mesmo (DUARTE, 2016, p. 43).

Outra contribuição de Vigotski ao desenvolvimento do pensamento das crianças e dos adolescentes está relacionada aos conceitos científicos e espontâneos. Na obra *Pensamento e Linguagem*, Vigotski (2010) afirmou que a aprendizagem escolar dos conceitos científicos realiza uma significativa transformação nos conceitos espontâneos que a criança e o adolescente possuem. Ademais, para Vigotski, essas duas classes de conceitos estão ligados na história do aluno.

“O desenvolvimento dos conceitos espontâneos e científicos - cabe pressupor - são processos intimamente interligados, que exercem influências um sobre o

outro. [...] independentemente de falarmos do desenvolvimento dos conceitos espontâneos ou científicos, trata-se do desenvolvimento de um processo único de formação de conceitos, que se realiza sob diferentes condições internas e externas mas continua indiviso por sua natureza e não se constitui da luta, do conflito e do antagonismo de duas formas de pensamento que desde o início se excluem” (VIGOTSKI, 2010, p. 261).

Pode-se dizer que há uma relação direta entre o conceito e o objeto quando aplicado aos conceitos espontâneos. Para os conceitos científicos, a relação com o objeto não é direta, é indireta. Os conceitos científicos se relacionam com outros conceitos de um mesmo sistema teórico, exigindo um exercício constante de abstração. Por isso a aprendizagem escolar é de extrema importância para Vigotski, pois ela que possibilita ao estudante o contato com os conceitos científicos.

A aprendizagem não começa só na idade escolar, ela existe também na idade pré-escolar. Uma investigação futura provavelmente mostrará que os conceitos espontâneos da criança são um produto da aprendizagem pré-escolar tanto quanto os conceitos científicos são um produto da aprendizagem escolar (VIGOTSKI, 2009, p. 388).

Para Vigotski (2010), a força dos conceitos científicos significaria a fraqueza dos conceitos espontâneos, e vice-versa, a força dos conceitos espontâneos representaria a fraqueza dos conceitos científicos. Na leitura de Duarte (2016), a força dos conceitos científicos estaria na elevada capacidade de sistematização, generalização e síntese. Já a força dos conceitos espontâneos ficaria na experiência pessoal da criança e do adolescente, em uma relação muito próxima ao objeto, porém formada de um caráter assistemático e limitada devida sua aplicação prática. Os conceitos espontâneos teriam a função de fazer com que a criança e o adolescente adquirissem os conceitos científicos para que seus pensamentos não se mantivessem refém do senso comum das relações cotidianas.

A educação social, que surge na grandiosa época de reconstrução definitiva da humanidade, está chamada a realizar o que sempre sonhou a humanidade como um milagre religioso: que os cegos vejam e os surdos falem. Provavelmente a humanidade vencerá, cedo ou tarde, a cegueira, a surdez, a debilidade mental. Porém a vencerá muito antes no plano social e pedagógico que no plano médico e biológico (VIGOTSKY, 1997, p. 82).

Utilizando outra contribuição, talvez a mais conhecida, criada por Vigotski para compreensão dos processos de aprendizagem certamente é o conceito de zona de desenvolvimento imediato (ZDI), ou próximo.

Afirmamos que em colaboração a criança sempre pode fazer mais do que sozinha. No entanto, cabe acrescentar: não infinitamente mais, porém só em determinados limites, rigorosamente determinados pelo estado do seu desenvolvimento e pelas suas potencialidades intelectuais. Em colaboração,

a criança se revela mais forte e mais inteligente que trabalhando sozinha, projeta-se ao nível das dificuldades intelectuais que ela resolve, mas sempre existe uma distância rigorosamente determinada por lei, que condiciona a divergência entre a sua inteligência ocupada no trabalho que ela realiza sozinha e a sua inteligência no trabalho em colaboração. (...) A possibilidade maior ou menor de que a criança passe do que sabe para o que sabe fazer em colaboração é o sintoma mais sensível que caracteriza a dinâmica do desenvolvimento e o êxito da criança. Tal possibilidade coincide perfeitamente com sua zona de desenvolvimento imediato (VIGOTSKI, 2010, p. 329).

Já a ZDI é um estágio de desenvolvimento das funções psíquicas em que as crianças são capazes de adquirir, somente se ajudadas por um educador ou por parceiros mais capazes. Sendo assim, o ensino não pode ficar restrito à zona de desenvolvimento real da criança, mas operar na ZDI, no intuito de provocar “novos processos internos de desenvolvimento” (PASQUALINI, 2010, p. 174).

O último aspecto a ser mencionado sobre a teoria sócio-cultural de Vigotski neste trabalho é a imitação. “A imitação, se concebida em sentido mais amplo, é a forma principal em que se realiza a influência da aprendizagem sobre o desenvolvimento” (VIGOTSKI, 2010, p. 331).

A imitação não pode ser compreendida como uma atividade puramente mecânica. Também vale destacar que a imitação humana é diferente da imitação animal, pois este não possui a capacidade, via imitação, de desenvolver suas faculdades intelectuais e nem é capaz de “assimilar nada de essencialmente novo em comparação com o que já sabe” (VIGOTSKI, 2010, p. 330). A imitação para Vigotski tem outro sentido para o desenvolvimento do intelecto da criança:

A criança só pode imitar o que se encontra na zona das suas próprias potencialidades intelectuais. Assim, se eu não sei jogar xadrez, isto é, se até mesmo o melhor enxadrista me mostrar como ganhar uma partida, eu não vou conseguir fazê-lo. Se eu sei aritmética, mas tenho dificuldade de resolver algum problema complexo, a mostra da solução pode me levar imediatamente à minha própria solução, mas se eu não sei matemática superior a mostra da solução de uma equação diferencial não fará meu próprio pensamento dar um passo nesta direção. Para imitar, é preciso ter alguma possibilidade de passar do que eu sei fazer para o que não sei (VIGOTSKI, 2010, p.328).

Na educação escolar, Vigotski revela que: “a aprendizagem na escola se organiza amplamente com base na imitação. Porque na escola a criança não aprende o que sabe fazer sozinha, mas o que ainda não sabe e lhe vem a ser acessível em colaboração com o professor e sob sua orientação” (VIGOTSKI, 2010, p. 331). Essa enorme relevância que Vigotski deu

acerca da imitação como base da aprendizagem escolar, distingue-se consideravelmente das teorias pedagógicas atuais, que descartam o uso da imitação por considerar algo prejudicial ao desenvolvimento da aprendizagem da criança do adolescente.

A.6 ATIVIDADES COM OS ESTUDANTES

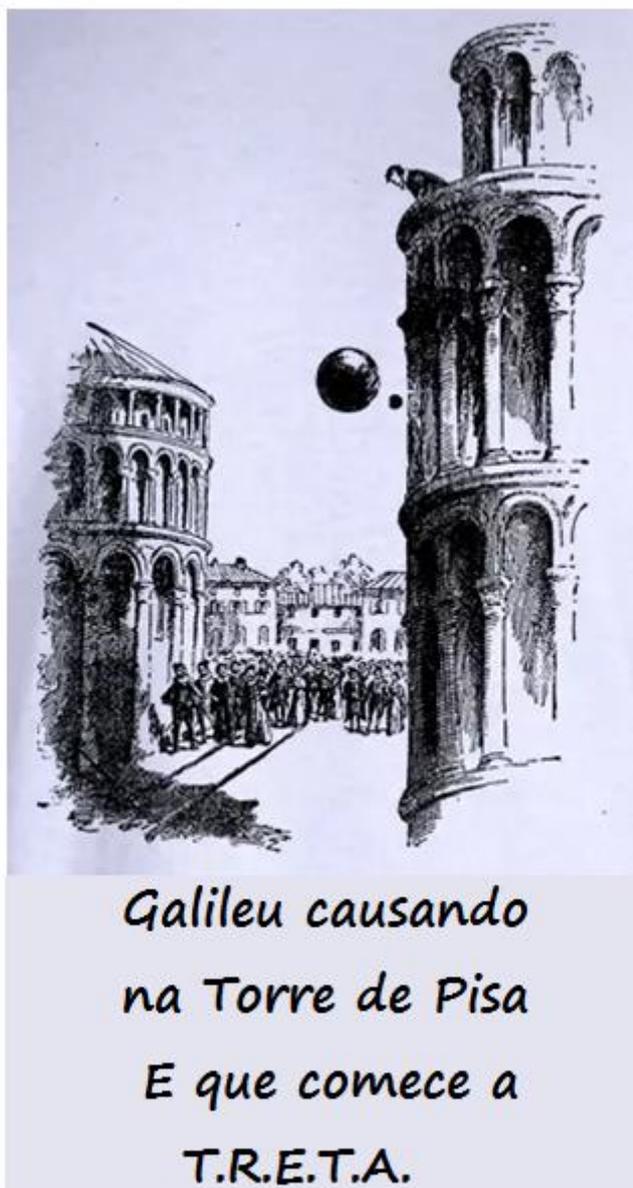


Figura adaptada de DRAKE. S, Galileo: a very short introduction,
Oxford University Press, 2001, p. 23.

LEVANTAMENTO DE IDEIAS PRÉVIAS

QUESTÃO 1

Soltos ao mesmo tempo da mesma altura de 2 metros em uma sala de aula, quem chega primeiramente no chão: uma folha de papel aberta ou um caderno? Justifique sua resposta.

QUESTÃO 2

Soltos ao mesmo tempo da mesma altura de 2 metros em uma sala de aula, quem cai primeiro: uma bolinha de papel ou um caderno? Justifique sua resposta.

QUESTÃO 3

Imagine você segurando um caderno com uma folha de papel apoiada em cima desse mesmo caderno. Se soltarmos o caderno com a folha em cima, o que acontece com a folha de papel durante a queda em comparação com a queda do caderno?

QUESTÃO 4

Um martelo e uma pena soltos ao mesmo tempo e da mesma altura na superfície da Lua, quem você acha que cairá primeiramente no chão lunar: o martelo ou a pena? Justifique sua resposta.

QUESTÃO 5

O valor da aceleração da gravidade na Terra é equivalente a 10 m/s^2 . Se uma bola de ferro for solta de uma torre alta, qual a velocidade dessa bola em 1 segundo? Em 2 segundos? E em 3 segundos? (Despreze os efeitos da resistência do ar).

ATIVIDADE 1

O EXPERIMENTO MENTAL DAS DUAS PEDRAS CONJUGADAS

O filósofo Aristóteles dizia que móveis de pesos diferentes se movem no mesmo meio com velocidades diferentes proporcionais aos seus respectivos pesos. Por exemplo, se soltarmos duas pedras do alto de uma torre, sendo uma mais pesada que a outra, a mais pesada move-se com velocidade maior. Observe o trecho abaixo retirado do livro “Duas Novas Ciências” de Galileu, publicado originalmente em 1638:

“[Aristóteles] supõe que móveis de pesos diferentes se movem no mesmo meio com velocidades desiguais, as quais mantêm entre si a mesma proporção que os pesos; de modo que, por exemplo, um móvel dez vezes mais pesado que outro, move-se com uma velocidade dez vezes maior”.

Além de Galileu trabalhar com experimentos reais no cotidiano de seu trabalho como cientista, ele gostava de fazer “experimentos mentais” para analisar o que Aristóteles dizia. Vamos imaginar duas pedras A e B, a pedra B bem mais pesada que a pedra A, soltas da mesma altura do alto de uma torre, pode ser a Torre de Pisa.

a) Quantas e quais as diferentes possibilidades que essas pedras podem chegar ao chão uma em relação à outra?

b) Segundo a lógica de Aristóteles qual pedra chegará primeiramente ao chão? Justifique.

ATIVIDADE 2

DUAS BOLAS CAINDO DO ALTO DE UMA TORRE

No livro *Discursos*, Galileu contesta a declaração de Aristóteles mostrando que o filósofo está em contradição com o resultado da experiência sobre duas bolas de pesos diferentes caindo do alto de uma torre:

Salviati: Não desejaria Sr. Simplicio, que fizesse como tantos outros que, desviando o raciocínio do objetivo principal, se agarram a qualquer expressão minha que se afasta da verdade apenas por um cabelo, e querem esconder debaixo desse cabelo o erro de outro do tamanho da amarra de um navio. Aristóteles diz: “Uma bola de ferro de cem libras** que cai de uma altura de cem braças chega ao solo antes que uma bola de uma libra tenha descido apenas uma braça***.”, eu afirmo que as duas chegam ao mesmo tempo. Comprova-se, fazendo a experiência, que a maior precede a menor em dois dedos, ou seja, que no momento em que a maior chega ao solo, a outra está a uma distância de dois dedos: ora o senhor quer esconder as noventa e nove braças de Aristóteles sob esses dois dedos e, falando apenas de meu pequeno erro, silenciar sobre a enormidade do outro.*

* **amarra** de um navio é um tipo de corrente ligada à âncora do navio.

** Uma **libra** é equivalente a 454 gramas.

***Uma **braça** é equivalente a 1,83 metros.

(<http://www.fau.usp.br/depprojeto/labnav/textos/tse0400p.htm>)

a) Repare no texto que há uma disputa de narrativa entre qual a teoria do movimento que descreve melhor a queda das duas bolas de ferro, a teoria de Galileu versus a teoria de Aristóteles. Destaque os trechos em que aparecem as críticas de Galileu a teoria de Aristóteles.

b) Na afirmação de Galileu, por que você acha que as bolas de ferro chegam ao solo a uma diferença de dois dedos?

c) se pudéssemos fazer essa experiência das duas bolas em um local vazio de ar, no chamado “vácuo”, qual bola chegaria primeiramente no chão? E se no lugar das bolas, soltássemos uma bola de boliche e uma pena soltas no vácuo da mesma altura, qual desses dois objetos chegaria primeiro ao chão?

ATIVIDADE 3

COMO SE “MOVIMENTA” O MOVIMENTO?

Na época de Galileu já muito se estudava o movimento de queda dos corpos. O ensino do movimento mais usado nas universidades na época de Galileu era o movimento interpretado por Aristóteles, como já vimos nas atividades anteriores. Galileu começa a dar uma interpretação diferente da interpretação de Aristóteles. Vamos estudar um pouco melhor o movimento estudado por Galileu. Veja no livro *Duas Novas Ciências* o que ele falava sobre o estudo do movimento.

“Vamos expor uma nova ciência a respeito de um tema muito antigo. Não existe na natureza nada anterior ao MOVIMENTO e, com referência a ele, não poucos e pequenos volumes foram escritos pelos filósofos; apesar disso muitas propriedades dignas de serem conhecidas não foram até o momento, nem observadas, nem demonstradas. Observaram-se algumas mais simples, como, por exemplo, que o movimento natural dos graves em queda livre se acelera continuamente; porém, não foi demonstrada até o momento a proporção segundo a qual se produz sua aceleração. Também não foi demonstrado, que eu saiba, que um móvel, que cai a partir do repouso, percorre em tempos iguais espaços que mantêm entre si a mesma proporção que têm os números ímpares sucessivos a partir da unidade”.

Desde a época de Galileu, já se conhecia os famosos Movimento Uniforme (M.U.) e Movimento Uniformemente Acelerado (M.U.A.) ou com outro nome Movimento Uniformemente Variado (M.U.V.), tem variado no nome, pois o movimento pode ser acelerado ou desacelerado uniformemente. Porém não se sabia a “proporção segundo a qual se produz sua aceleração”, quer dizer, não se sabia a relação matemática desse tipo de movimento. Essa “proporção” que Galileu descobrira era algo inovador na época dele, talvez seja a maior contribuição de Galileu à ciência presente no livro *Duas Novas Ciências*. Para isso, precisamos nos apropriar desse conhecimento. Vamos relembrar alguns conceitos que estudamos em cinemática.

1) Na rodovia dos Bandeirantes, o limite de velocidade para os automóveis é de 120 km/h e para os caminhões é de 90 km/h.

a) Se um automóvel vai de Campinas para São Paulo com velocidade média de 120 km/h, quer dizer que este automóvel viajou com a velocidade de 120 km/h durante todo o trajeto? Justifique.

b) Pode dizer que a velocidade foi de 120 km/h durante um certo intervalo de tempo? Justifique.

2) Galileu definiu o Movimento Uniforme (MU) como:

“Entendo por movimento constante ou uniforme aquele cujos espaços, percorridos por um móvel em tempos iguais quaisquer, são iguais entre si”.

No nosso dia a dia, sabemos que não é prático um móvel permanecer exatamente na mesma velocidade escalar (velocidade constante). Porém a compreensão do conceito de velocidade constante é necessária para entendermos o movimento de queda dos corpos, além de outros tipos de movimentos. Vamos imaginar uma pequena esfera se movimentando em uma superfície bem lisa. O movimento dela é descrito pela tabela abaixo:

Posição S (m)	Tempo t(s)
10	0
20	1
30	2
40	3
50	4

a) no tempo de $t = 0$ significa dizer que a esfera percorreu 10 m? Justifique.

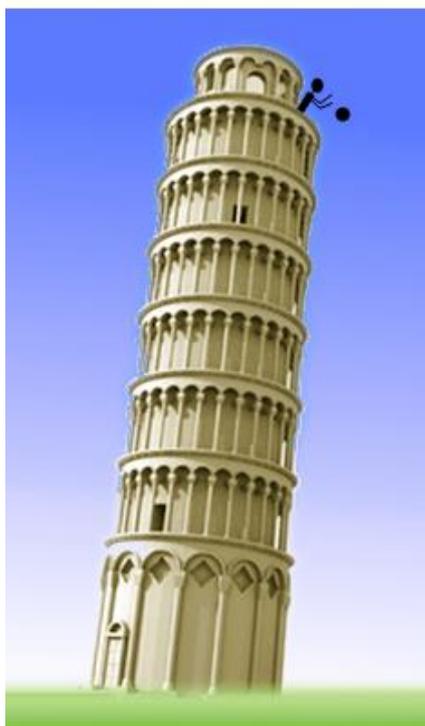
b) qual o valor da velocidade escalar média da esfera em todo o trajeto?

c) o movimento dessa esfera é um movimento uniforme (M.U.)?

3) Preste atenção na definição de Movimento Uniformemente Acelerado (MUA) feita por Galileu:

“chamamos movimento igualmente, ou seja, uniformemente acelerado, aquele que, partindo do repouso, adquire em tempos iguais momentos (acréscimos) iguais de velocidade”.

Vamos compreender o MUA. Imagine que uma bola de ferro, parecido com uma bola de canhão, seja solta do alto de uma torre e que a velocidade escalar da esfera varie em função do tempo de acordo com os valores da tabela abaixo:



Tempo t(s)	Velocidade v(m/s)
0	0
1	10
2	20
3	30
4	40
5	
6	
7	

a) Vocês conseguem prever quais os valores das velocidades nos espaços em branco da tabela acima?

b) Ainda em relação à tabela acima, quão rapidamente (velocidade) cai essa bola de ferro por segundo? Qual é a proporção (a divisão) da velocidade em relação ao tempo?

c) Assim como a velocidade escalar da queda da esfera varia com o tempo, a sua distância em relação ao chão também varia, como na tabela abaixo. Supondo que $g = 10 \text{ m/s}^2$, complete a tabela abaixo, utilizando a equação abaixo:

$$S = \frac{gt^2}{2}$$

Tempo t(s)	Distância percorrida S(m)
0	0
1	5
2	20
3	45
4	80
5	
6	
7	

d) Se a velocidade em $t = 1$ s era de 10 m/s na primeira tabela, porque a distância percorrida nesse mesmo intervalo de tempo foi de 5 m e não de 10 m?

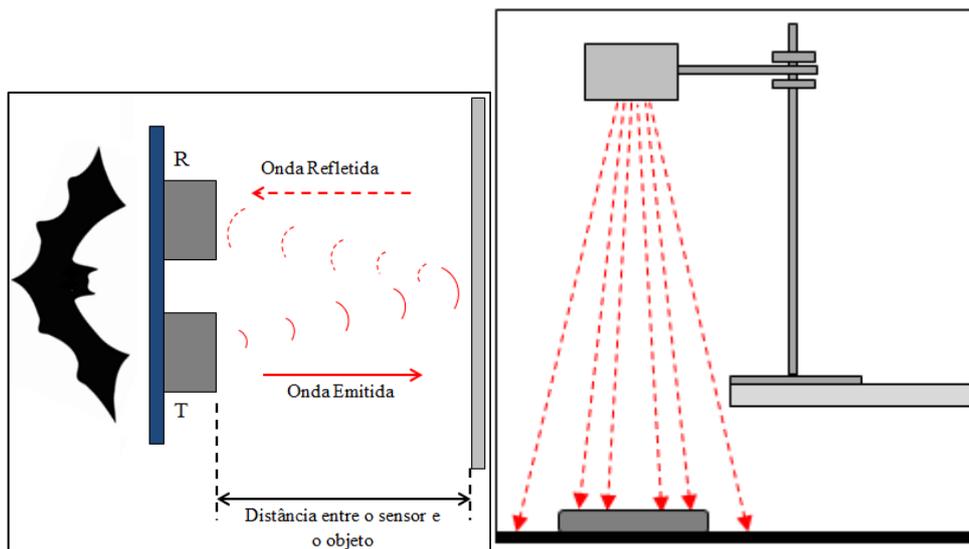
e) Vamos encontrar uma das mais famosas contribuições de Galileu ao movimento de queda dos corpos, discutidas no livro Discursos. Galileu disse:

“Se um móvel, partindo do repouso, cai com um movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados desses mesmos tempos”.

Em notação atual Galileu quis dizer que $S \propto t^2$ (distância é proporcional ao tempo ao quadrado). Com a tabela anterior, vamos tentar achar essa proporção.

ATIVIDADE 4

UTILIZANDO O SENSOR ULTRASSÔNICO



a) Vamos calibrar o sensor para verificarmos se está medindo de modo satisfatório.

b) como vocês já sabem, Galileu afirmou que duas bolas de ferro de diferentes pesos, soltas da mesma altura, chegam ao mesmo tempo no chão. Vamos preparar o sensor ultrassônico e os outros equipamentos dispostos na mesa para fazer medições e comprovar a teoria da queda dos corpos de Galileu de que **corpos de diferentes pesos chegam ao mesmo tempo no chão.**

Medidas caixa menor	t (s)	S (cm)
Inicial		
Final		
Final - Inicial		

Medidas caixa maior	t (s)	S (cm)
Inicial		
Final		
Final - Inicial		

c) Vamos confirmar, utilizando a experiência, a mais famosa lei matemática da queda dos corpos feita por Galileu apresentada pelo teorema:

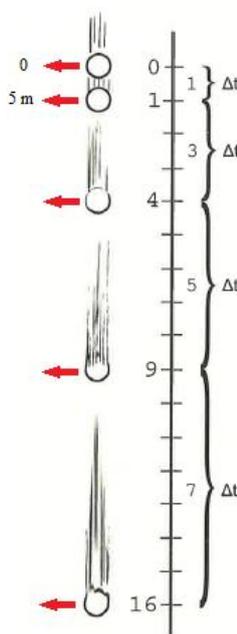
“Se um móvel, partindo do repouso, cai com um movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados dos tempos.”

Galileu prova a proporcionalidade entre o espaço percorrido e o quadrado dos tempos pela matemática e comprova essa proporcionalidade com experimento do plano inclinado e não com a queda vertical.

“Portanto, o que foi demonstrado no referente às quedas verticais, também acontece do mesmo modo para os movimentos que se realizam em planos inclinados quaisquer.”

Como nosso experimento foi feito para estudarmos a queda vertical, vamos chegar nessa proporção realizada por Galileu.

f) Da proporcionalidade entre o espaço percorrido e o quadrado dos tempos ($S=kt^2$), Galileu descobriu uma propriedade simples e bela, a saber, que os espaços percorridos em tempos iguais sucessivos em movimentos uniformemente acelerados estão “**entre si assim como os números ímpares a partir da unidade, a saber, 1, 3, 5, 7, 9...**” Vamos utilizá-la. Como pode se ver na figura abaixo, um corpo que cai a partir do repouso e sem atrito, no primeiro intervalo de tempo Δt o corpo percorre a distância $1d$, no segundo Δt a distância $3d$ (totalizando $4d$), no terceiro Δt a distância $5d$ (totalizando $9d$), e assim por diante. Vamos supor que cada distância “ d ” valha 5 metros, preencha as posições em cada Δt da queda da bolinha.



ATIVIDADE 5

Afinal, Galileu fez ou não fez o famoso experimento da Torre de Pisa?



Figura adaptada de DRAKE. S, Galileo: a very short introduction Drake, Oxford University Press, 2001, p. 23.

Foi então que, para grande indignação de todos os filósofos, ele [Galileu] demonstrou — com o auxílio de experiências, provas e raciocínios exatos — a falsidade de numerosíssimas conclusões de Aristóteles sobre a natureza do movimento, conclusões que, até então, eram tidas como perfeitamente claras e indubitáveis⁵. Assim, entre outras, a de que as velocidades de móveis da mesma matéria, mas desigualmente pesados e movendo-se através do mesmo meio, não obedecem a proporção de seus pesos, como é declarado por Aristóteles, mas se movem, todos, com a mesma velocidade. O que demonstrou em repetidas experiências, feitas no alto do campanário de Pisa, na presença de todos os outros professores e filósofos e de toda a Universidade (relato de Vincenzo Viviani, o primeiro biógrafo de Galileu, publicado em 1717).*

Na atividade anterior, utilizamos o sensor ultrassônico para medirmos os tempos de queda de diferentes objetos. Porém é necessário observar que fizemos uma comparação com o experimento da Torre de Pisa, isso não quer dizer, que reproduzimos o experimento nas mesmas condições que foram soltas as bolas de ferro do lendário experimento da Torre de Pisa.

A lendária história do experimento da Torre de Pisa é uma das mais famosas narrativas da história da ciência, essa narrativa conta que Galileu, em 1590, subiu ao topo da torre inclinada de Pisa, e lá do alto soltou dois objetos de pesos diferentes, com a finalidade de contestar a lei da queda de Aristóteles, lei esta que afirmava que a velocidade de queda dos corpos é proporcional ao seu peso. Com esta exposição do alto da torre inclinada, Galileu demonstrou aos professores e alunos reunidos em volta da torre que Aristóteles estava errado.

a) Como já vimos durante a aula de hoje, muito provavelmente, Galileu não fez o experimento da Torre de Pisa. Por que Galileu não fez esse experimento?

⁵ Indubitável: que não deixa margem a dúvidas; o que é óbvio e evidente.

REFERÊNCIAS

- BANZI, M. Getting Started with Arduino. Sebastopol: O'Reilly Media, 2009.
- CASPER, B. M. Galileo and the fall of Aristotle: a case of historical injustice? American Journal of Physics, v. 45, n. 4, Apr. 1977.
- COOPER, L. Aristotle, Galileo and the tower of Pisa, Menasha: Cornell University Press, 1935.
- CREASE, R. P. Os dez mais belos experimentos científicos, Rio de Janeiro: Zahar, 2006.
- DRAKE, S. Galileo at work. Chicago: University of Chicago Press, 1978.
- DUARTE, N. Os conteúdos escolares e a ressurreição dos mortos: contribuição à teoria histórico-crítica do currículo. Campinas: Autores Associados, 2016.
- FRANKLIN, A. Galileo and the leaning tower: an Aristotelian interpretation. Physics Education, v. 14, 1979.
- GALERIU, C. et al. An Arduino Investigation of Simple Harmonic Motion. The Physics Teacher, v. 52, p. 157-159, Mar. 2014.
- GALILEI, G. Duas novas ciências. 2ª edição. São Paulo: Nova Stella, 1988 [1638].
- GALILEI, G. Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano. São Paulo: Editora 34, 2011 [1632].
- GREGORY, R. A. Discovery, or the Spirit and Service of Science, London: Macmillian and Co., 1917.
- HESSEN, B. As raízes socioeconômicas dos “Principia” de Newton. *In: II CONGRESSO INTERNACIONAL DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA E DA TECNOLOGIA*, Londres, 1931. Tradução Ruy Gama e Sylvia Ficher, 1993.
- HEWITT, P. Física Conceitual, 12ª edição, Porto Alegre: Editora Bookman, 2015.
- KUHN, T. A Estrutura das Revoluções Científicas, 13ª edição. São Paulo: Editora Perspectiva, 2003.
- KOYRÉ, A. Estudos de História do Pensamento Científico, Rio de Janeiro: Editora Forense Universitária, 1982.
- LEDERMAN, L. M. TERESI, D. The God Particle, New York: Bantam Press, 1993

MACISSAC, D. Hämäläinen, A. Physics and technical characteristics of ultrasonic sonar systems. The Physics Teacher, v. 40, p. 39-46, 2002.

MARICONDA, P. Introdução. In: GALILEI, G. Duas novas ciências. 2ª edição. São Paulo: Nova Stella, 1988 [1638], p. xxvii-xxxii.

MARICONDA, P. R. Galileu e a Ciência Moderna. Cadernos de Ciências Humanas – Especiaria, v. 9, n.16, p. 267-292. Dez. 2006a.

MARICONDA, P. R.; VASCONCELOS, J. Galileu e a Nova Física, São Paulo: Odysseus, 2006b.

MARX, K e ENGELS, F. A ideologia alemã, 2ª edição. São Paulo: Martins Fontes, 2001.

MARX, K. O capital, livro I, 2ª edição. São Paulo: Boitempo, 2017.

PASQUALINI, J. C. O papel do professor e do ensino na educação infantil: a perspectiva de Vigotski, Leontiev e Elkonin. In MARTINS, L. M. DUARTE, N. (orgs.). Formação de professores: limites contemporâneos e alternativas necessárias. São Paulo: Editora UNESP, 2010, p. 161-191.

PINO, A. O social e o cultural na obra de Lev S. Vigotski. Educação & Sociedade, Campinas, ano XXI, n.71, p. 45-78, Jul. 2000.

ROSSING, T.D. Principles of vibrations and Sound. 2ª edição. New York: Springer-Verlag, 2004.

SEGRE, M. Galileo, Viviani and Tower of Pisa, Studies in History and Philosophy of Science, v. 20, n. 4, p. 435-454, 1989.

SILVEIRA, F. L. Determinando a aceleração gravitacional. Revista de Enseñanza de la Física, Córdoba, v. 10, n. 2, p. 29-35, 1995.

VIGOTSKI, L. S. A construção do pensamento e da linguagem. 2ª edição. São Paulo: Martins Fontes, 2010.

VYGOTSKI, L. S. Obras escogidas. Madrid: Visor, 1995 tomo III

VYGOTSKI, L. S. Obras escogidas. Madrid: Visor, 1997 tomo V

VUOLO, J. H. Fundamentos da teoria de erros. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blucher, 1996.