

GALILEU E O EXPERIMENTO DA TORRE DE PISA NO ENSINO MÉDIO



W. R. S. Alves e J. V. López

UFSCAR – Sorocaba

Abril de 2019

PREFÁCIO

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

Os autores.

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

1. O ARDUINO	4
1.1. A Placa Arduino	4
1.2. O Programa Arduino IDE.....	5
1.3. O Sensor Ultrassônico HC-SR04	8
2. GALILEU E A TORRE DE PISA	10
2.1. Galileu em seu Tempo.....	10
2.2. O Experimento da Torre de Pisa	13
3. CONTEÚDO DE FÍSICA PRESENTE NAS <i>DUAS NOVAS CIÊNCIAS</i>	20
4. O APARATO EXPERIMENTAL DE QUEDA VERTICAL	29
5. REFERENCIAL TEÓRICO	43
6. QUESTIONÁRIO DAS ATIVIDADES COM OS ESTUDANTES	47
REFERÊNCIAS	67

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).

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.

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 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 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.

1.2 O Programa Arduino IDE

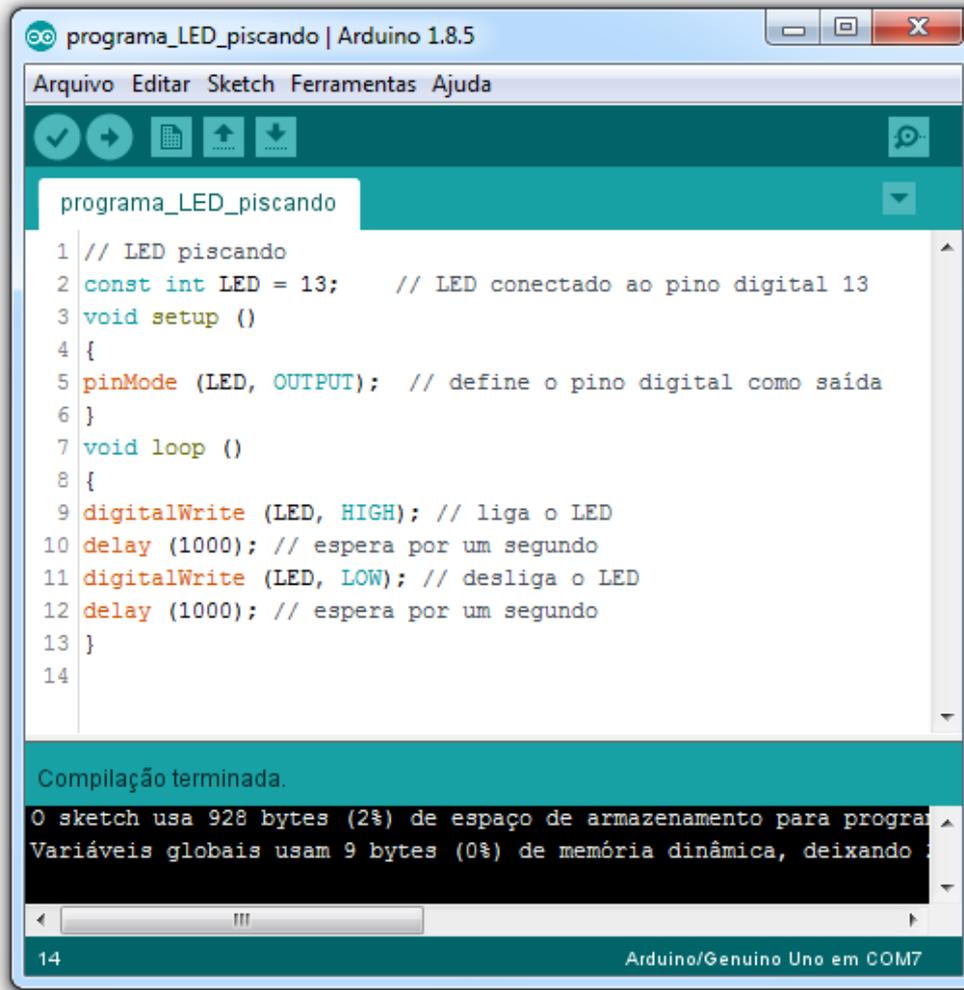
O Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) é um ambiente de programação que permite ao usuário esboçar diferentes tipos de programas e carregá-los no microcontrolador Arduino. O Arduino usa uma linguagem de programação acessível, baseada na linguagem de programação chamada *Processing*. Depois 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 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 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 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 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); espera por um segundo; desliga o LED conectado ao pino 13; e espera por um segundo e volta para o início do "loop".

Figura 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
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

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



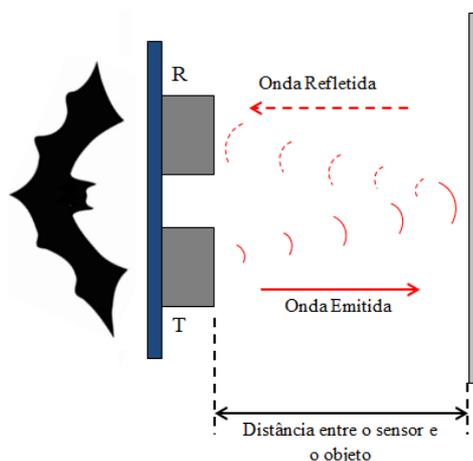
Fonte: Elaborado pelo autor.

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 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.

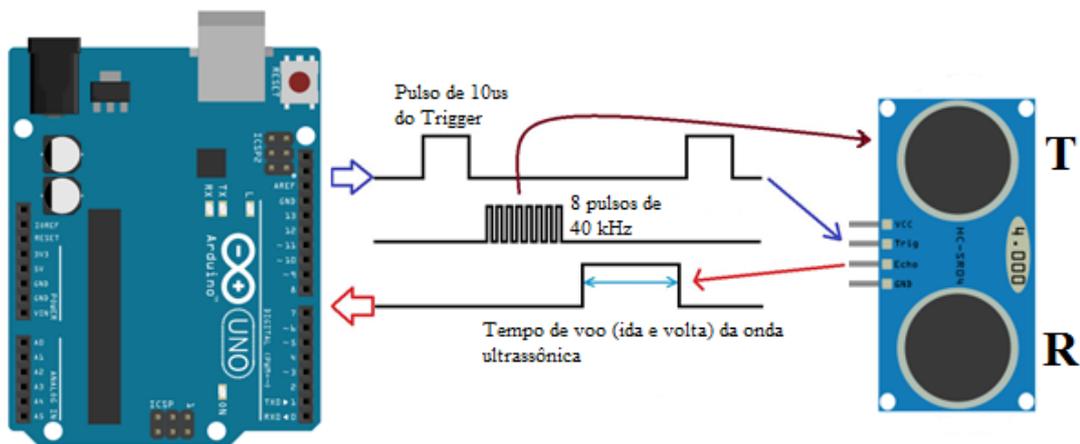
Figura 4 - Representação do sensor ultrassônico HC-SR04 em funcionamento. “T” é inicial de transmissor e “R” de receptor



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 5). Nesse intervalo, o sensor mede o tempo até detectar a onda refletida pelo receptor (*echo*).

Figura 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. (1) segue o cálculo para obter a distância:

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

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.

2. GALILEU E A TORRE DE PISA

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.

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 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” (KOYRÉ, 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. 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 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,

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

Uma vez que a velocidade média é definida como

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

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

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

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:

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

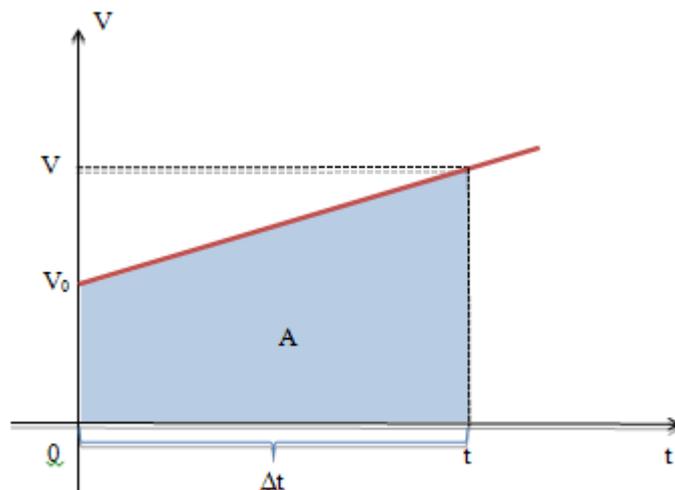
Em que Δv é a variação da velocidade diretamente proporcional ao intervalo de tempo Δt correspondente. Sendo v_0 a velocidade inicial, e v a velocidade num instante t , segue-se:

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

$$v = v_0 + at \quad (7)$$

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 6, para obtermos a função horária do espaço.

Figura 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:

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

$$dS = v dt \quad (9)$$

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

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

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

A área do gráfico é um trapézio, assim calculamos:

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

$$S = k \cdot t^2 \quad (17)$$

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

Utilizando mais uma vez o a figura 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:

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

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

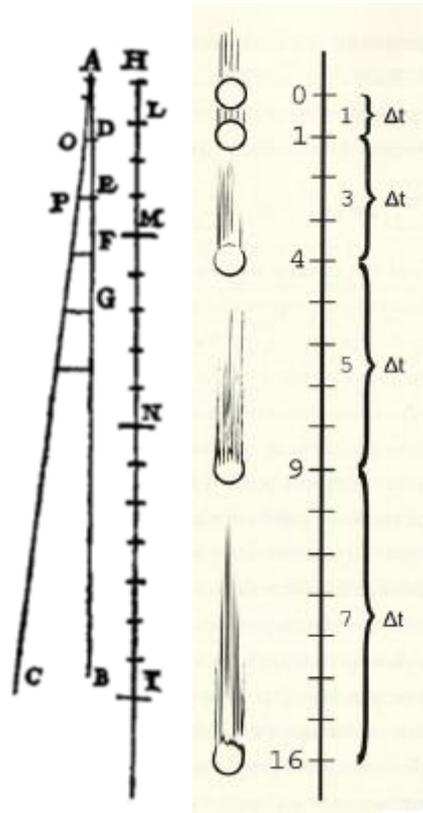
$$v_m = \frac{(v_0+v)}{2} \quad (20)$$

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

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.

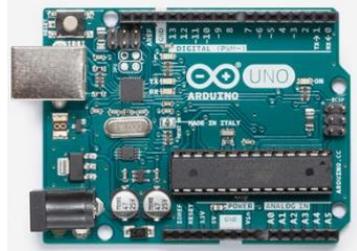
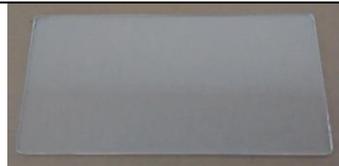
Para o movimento de queda vertical, fizemos o aparato semelhantemente ao produzido por empresas do ramo de laboratório de ensino, como, por exemplo, o sensor de movimento da PASCO⁴, empresa bem conhecida entre os professores de física. A vantagem do nosso aparato é que este é bem mais barato e tão confiável 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 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 8 - Lista de materiais com o preço médio especificado. Os produtos sem preço são de valor irrisório.

N°	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	

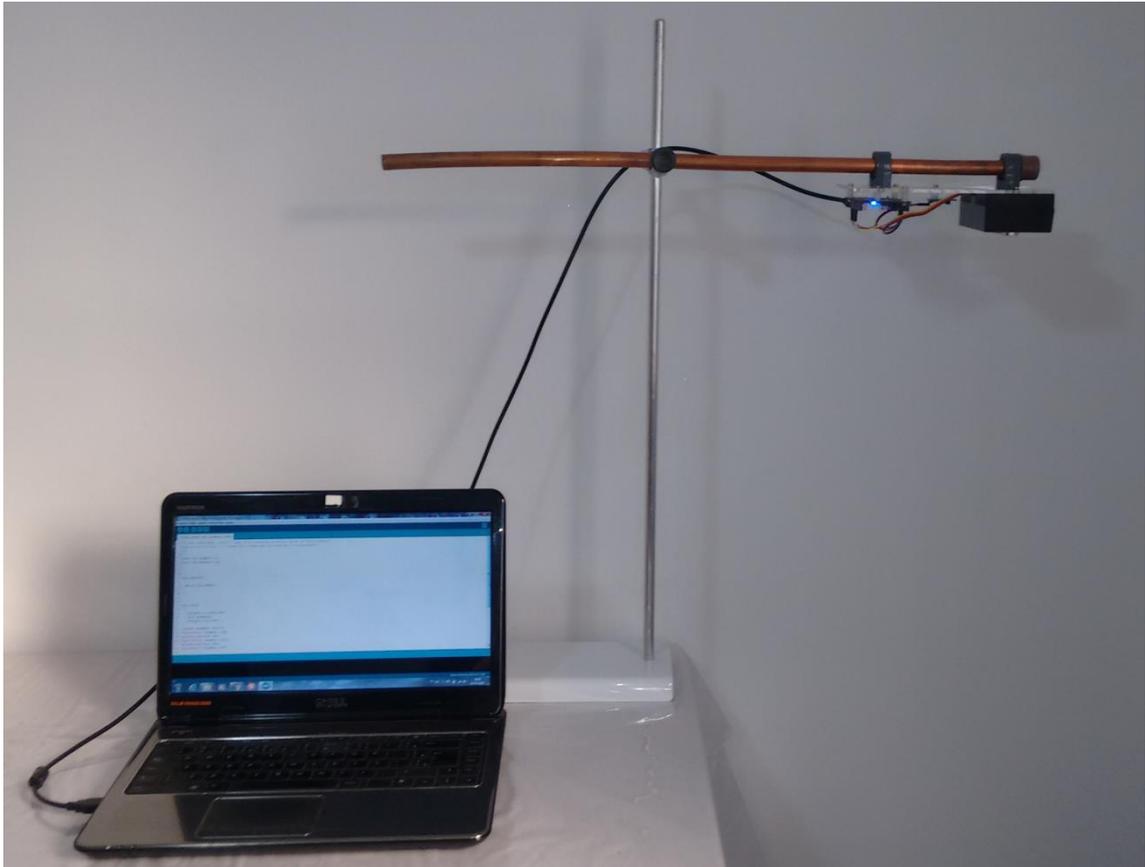
10	Suporte Universal	1 (R\$ 40,00)	
11	Mufa dupla	1 (R\$ 10,00)	
12	Tubo de cobre 5/8"	60 cm	
13	Abraçadeira para eletroduto de 20 mm	2	
14	Tubo pvc de 20 mm	2 pedaços de 10 mm	
15	Cap ("tampão") de 20 mm	1	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 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.

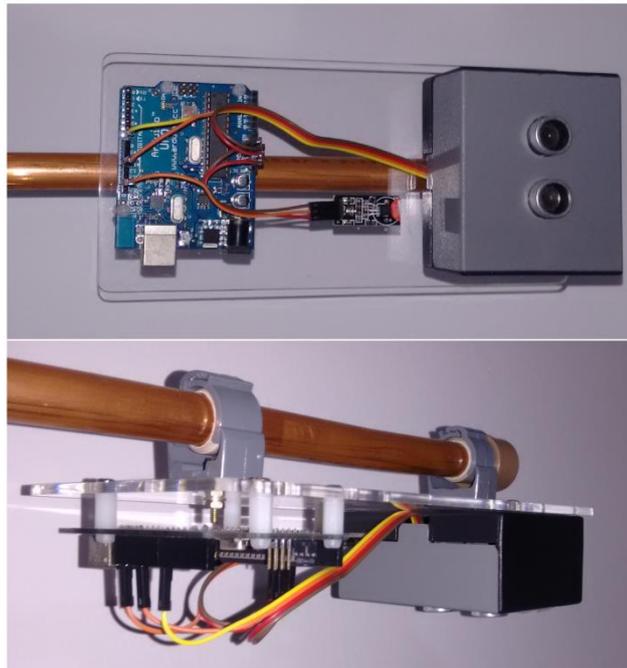
Figura 9 - Aparato experimental ultrassônico pronto para uso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 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 10 - Perfis do aparato ultrassônico.

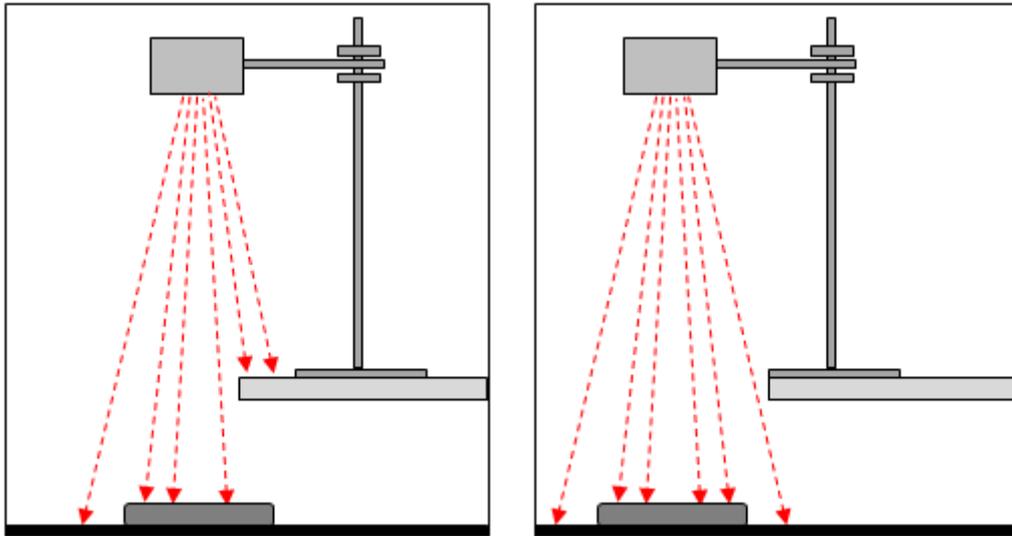


Fonte: Elaborado pelo autor.

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 11.

Figura 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:

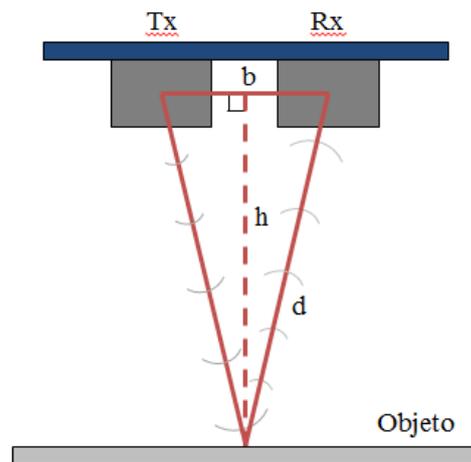
$$V = 331,0 + 0,6\Delta T, \text{ (Rossing, 2004)} \quad (21)$$

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 12.

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



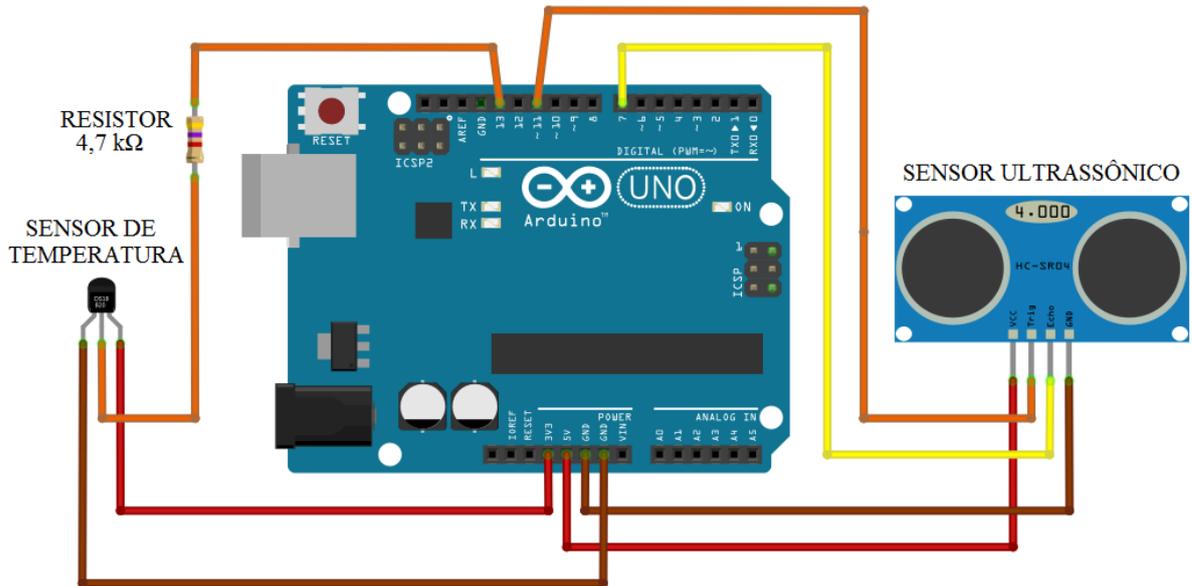
Fonte: Elaborado pelo autor.

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:

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

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 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 13 - Circuito eletrônico do aparato ultrassônico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O programa (*sketch*) encontra-se na figura 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 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 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 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 15 - Caixas de papelão utilizadas no experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 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 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:

$$S = kt^2 \quad (23)$$

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

$$\Delta k^2 = \left(\frac{\partial k}{\partial S}\right)^2 \cdot \Delta S^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial t}\right)^2 \cdot \Delta t^2 \quad (25)$$

$$\Delta k = \sqrt{\left(\frac{1}{t^4}\right) \cdot \Delta S^2 + \left(\frac{4S^2}{t^6}\right) \cdot \Delta t^2} \quad (26)$$

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 canaletta, pela qual se fazia descer a bola (GALILEI, 1988, p. 176, grifo nosso).

Pela eq. (26), consideramos as incertezas para acharmos a constante de proporcionalidade k , como pode ser visto na tabela 2:

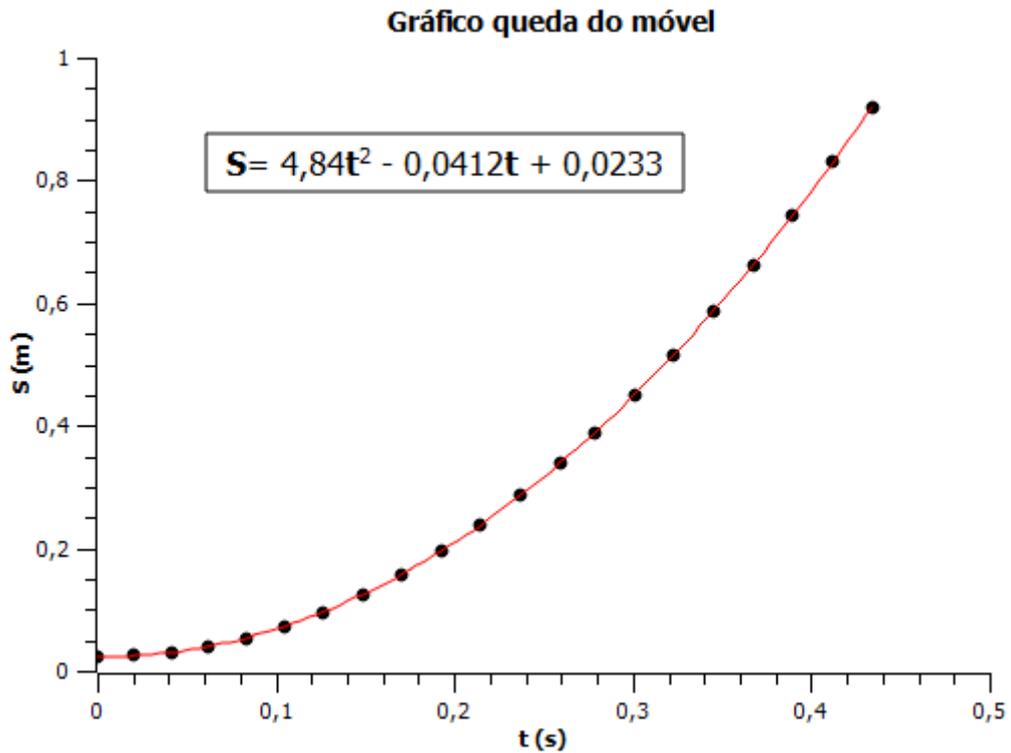
Tabela 2 - Medidas de posições e intervalos de tempo do móvel registrado pelo sensor ultrassônico.

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

Figura 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.

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.

QUESTIONÁRIO DAS 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”.

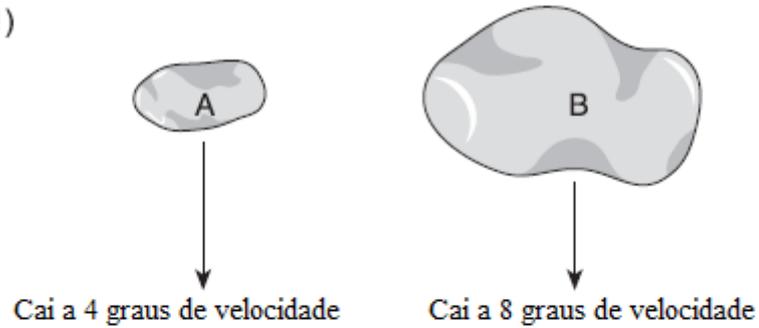
Além de Galileu trabalhar com experimentos reais no cotidiano de seu trabalho como cientista, ele gostava de fazer “experimentos mentais” para analisar o que Aristóteles dizia. Vamos imaginar duas pedras A e B, a pedra B bem mais pesada que a pedra A, soltas da mesma altura do alto de uma torre, pode ser a Torre de Pisa.

a) Quantas e quais as diferentes possibilidades que essas pedras podem chegar ao chão uma em relação à outra?

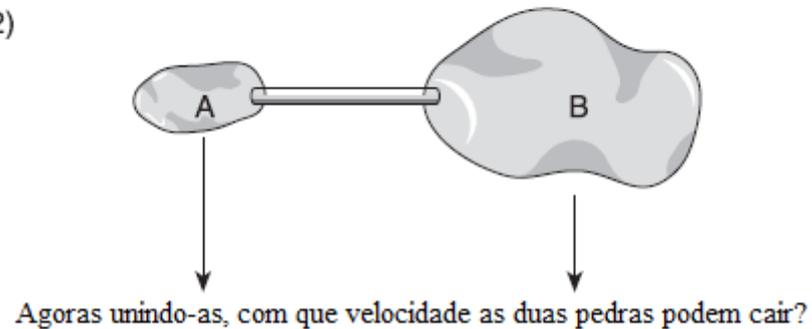
b) Segundo a lógica de Aristóteles qual pedra chegará primeiramente ao chão? Justifique.

c) 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.

(1)



(2)



d) podemos afirmar que há uma contradição lógica em Aristóteles?

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?

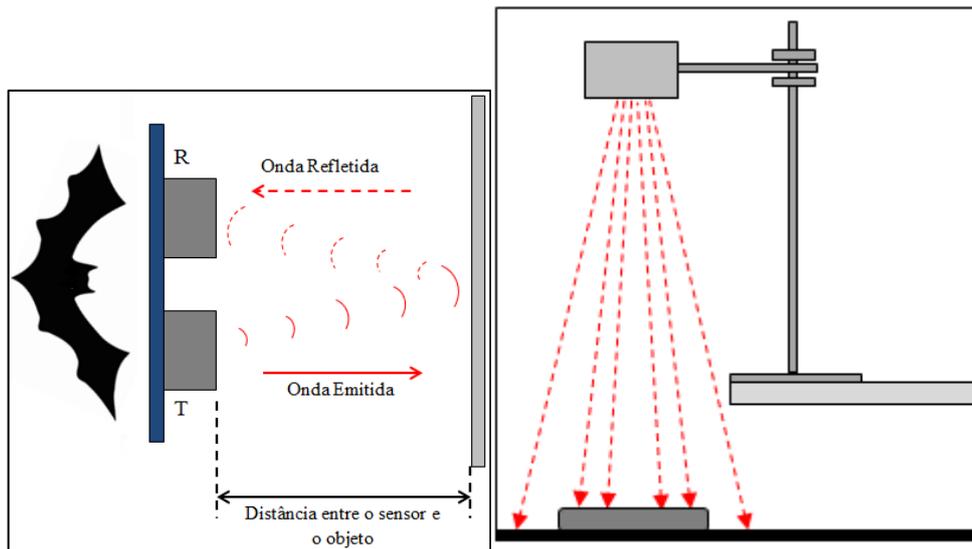
e) Vamos encontrar uma das mais famosas contribuições de Galileu ao movimento de queda dos corpos, discutidas no livro Discursos. Galileu disse:

“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:

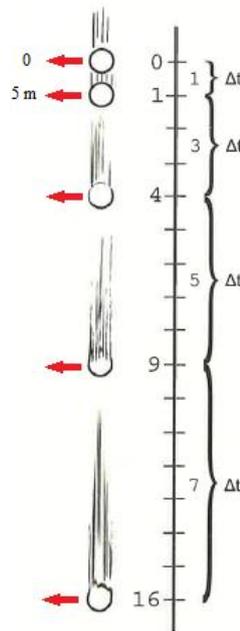
“Se um móvel, partindo do repouso, cai com um movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados dos tempos.”

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 Ensenanza 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.