UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DECANATO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
INSTITUTO DE FÍSICA
INSTITUTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENSINO DE CIÊNCIAS

O USO DE EXPERIMENTOS HISTÓRICOS NO ENSINO DE FÍSICA: INTEGRANDO AS DIMENSÕES HISTÓRICA E EMPÍRICA DA CIÊNCIA NA SALA DE AULA

RONALDO CÉSAR DE OLIVEIRA PAULA

ORIENTADOR:

PROF. DR. CÁSSIO COSTA LARANJEIRAS

BRASÍLIA - DF
2006

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DECANATO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
INSTITUTO DE FÍSICA
INSTITUTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENSINO DE CIÊNCIAS

O USO DE EXPERIMENTOS HISTÓRICOS NO ENSINO DE FÍSICA: INTEGRANDO AS DIMENSÕES HISTÓRICA E EMPÍRICA DA CIÊNCIA NA SALA DE AULA

RONALDO CÉSAR DE OLIVEIRA PAULA

Dissertação realizada sob orientação do Prof. Dr. Cássio Costa Laranjeiras e apresentada à banca examinadora como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Ensino de Ciências – Área de Concentração "Ensino de Física", pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade de Brasília.

BRASÍLIA - DF

2006

FOLHA DE APROVAÇÃO

Ronaldo César de Oliveira Paula

O Uso de Experimentos Históricos no Ensino de Física: Integrando as Dimensões Histórica e Empírica da Ciência na Sala de Aula

Dissertação apresentada à banca examinadora como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Ensino de Ciências – Área de Concentração "Ensino de Física", pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade de Brasília.

Aprovada em de

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cássio Costa Laranjeiras (Instituto de Física-UnB)
(Presidente)

Prof. Dr. Ivan Ferreira da Costa (Instituto de Física-UnB)
(Membro Interno)

Prof. Dr. André Ferrer P. Martins (Departamento de Educação-UFRN)
(Membro Externo)

Prof. Dr. Wildson Luiz Pereira dos Santos (Instituto de Química-UnB)
(Suplente)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à Deus mas também às pessoas que me acompanharam nessa caminhada:

Ao corpo docente do Programa de Pós Graduação em Ensino de Ciências da UnB.

Aos colegas da 1ª turma: Sebastião, Rober, Jairo, Valéria, Renata e Felipe.

Ao meu Orientador, Professor Cássio, pelos muitos ensinamentos.

Aos meus pais, José e Dulcinéia pela sólida base familiar.

Aos meus irmãos, Fábio, Ricardo, Bruno e Júnior.

À minha esposa, Eloísa, pelo amor e compreensão.

E, sobretudo à minha filha, Ana Luiza, que deu um novo sentido à minha vida.

Em se tratando de Física, as primeiras lições não deveriam conter nada mais do que experimentos e coisas interessantes para ver. Freqüentemente, um belo experimento é em si mesmo mais valioso do que vinte fórmulas extraídas de nossas mentes.

– Albert Einstein –

RESUMO

As ciências naturais são vistas como ciências empíricas porque a experimentação tem um papel central no processo de produção de novos conhecimentos (Höttecke, 2000). No entanto, a dimensão empírica da prática científica, enquanto constitutiva do conhecimento científico, é pouco explorada nas aulas de Física. A exemplo do que acontece com os aspectos históricos e filosóficos, geralmente concebidos como adereços motivacionais ao ensino da ciência, a experimentação científica, que a prática laboratorial representa, permanece ocultada, quando não distorcida. O objetivo deste trabalho é discutir o uso de "experimentos históricos" no Ensino de Física como estratégia no processo de contextualização e articulação da dimensão histórica do conhecimento científico na sala de aula. Como exemplo desta articulação, sugerimos o resgate da experiência do Plano Inclinado, extraída da obra *Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas Novas Ciências* (1638), de Galileu Galilei (1564-1642), onde a lei de queda dos corpos é investigada. Propomos ainda a exploração desse tema no contexto de sala de aula, sobretudo, através do emprego de simulações computacionais com o software *Modellus*.

Palavras-chave: Ensino de Física; História da Ciência; Galileu Galilei; Experimentação.

ABSTRACT

The natural sciences are regarded as empirical sciences because experimentation plays a central role in the process of production of new knowledge (Höttecke, 2000). However, the empirical dimension of scientific practice even though being an essential part of scientific knowledge is poorly used in the teaching of physics inside the classroom. As what happens with the historical and philosophical aspects, in general considered as secondary aspect to science education, scientific experimentation, represented in the laboratory practice, remains occult if not distorted. The purpose of this work is to discuss the use of "historical experiments" in the Teaching of Physics as a strategy in contextualizing and articulating the historical dimension of scientific knowledge inside the classroom. As an example of this articulation, the use of the inclined plane used in the *Discourses and Mathematical Demonstrations about the Two New Sciences* (1638) of Galileu Galilei (1564-1642) is suggested, where the law of the fall of the bodies is investigated. We propose in exploration, that this should be researched in the classroom context, mainly through the means of computational simulations with the software *Modellus.*

Keywords: Physics Education; History of Science; Galileu Galilei; Experimentation.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

A idéia de que aspectos históricos deveriam ser incluídos no ensino, especialmente no ensino de ciências não é nova. No final do século XIX vamos encontrar Ernest Mach (1838-1916), físico e filósofo austríaco, defendendo uma abordagem histórico-filosófica para o Ensino de Ciências nas escolas (Mach, 1910). Sensível aos problemas do Ensino de Ciências, Pierre Duhem (1861-1916), já no início do século XX também levanta a voz em defesa do que ele chamava de “método histórico”, situando-o como o método mais legítimo, mais seguro, como a única forma de dar aos estudantes de Física uma visão clara e correta da complexa organização dessa ciência (Duhem, 1906, p.268). As críticas do físico Paul Langevin (1872-1946) ainda no início do século XX (Lavengevin, 1992), denunciando a negligência do ponto de vista histórico pelo Ensino de Ciências são outro marco importante de uma discussão que se estendeu por todo o século XX, adentrando o contexto novo do início do século XXI em pleno vigor.

No entanto, as diferentes abordagens para integrar a história e filosofia da ciência ao Ensino de Ciências têm demonstrado uma carência de integração de aspectos experimentais nas aulas de ciências (Höttecke, 2000, p.243). Essa realidade aponta para uma espécie de lacuna epistemológica, visto que as ciências naturais são vistas como ciências empíricas exatamente porque a experimentação tem papel relevante no processo de produção de novos conhecimentos. Neste sentido, a dimensão empírica da prática científica, enquanto constitutiva do conhecimento científico, é pouco ou quase nunca explorada nas aulas de Física. A exemplo do que acontece com os aspectos históricos e filosóficos, concebidos como simples elementos motivacionais ao ensino da ciência, a experimentação científica, que a prática laboratorial representa, permanece ocultada, quando não distorcida. Segundo Höttecke,

> Existe o perigo de que as ciências naturais pareçam estar restritas ao trabalho intelectual. Mesmo quando existe um esforço por integrar a dimensão histórica, filosófica e social da ciência aos currículos de ciência, a dimensão laboratorial da ciência como uma experiência vívida permanece ocultada. (Höttecke, 2000, p.343)

Podemos dizer que em conseqüência desta prática, que não deixa de explicitar certa perspectiva de conhecimento e também do papel do Ensino de Ciências na educação básica, a ciência é apresentada de maneira fragmentada, fora do seu contexto de produção, do âmbito da cultura e, portanto, destituída de integridade. É neste sentido que propomos neste trabalho o uso de "experimentos históricos" no Ensino de Física como estratégia de integração das dimensões histórica e empírica (que também tem sua historicidade) da ciência na sala de aula.

Este trabalho representa a materialização de um esforço no sentido de contribuir no processo de reflexão-ação na área de Ensino de Ciências, principalmente junto aos professores de física do Ensino Médio, na busca da superação de abordagens dicotômicas e fragmentadas em nossas práticas didático-pedagógicas.

O texto está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo procura resgatar os diversos papéis que a experimentação teve e tem no Ensino de Ciências de forma que possamos delimitar de maneira clara a sua área de atuação. Nesse processo é dada ênfase especial à concepção empirista-indutivista da ciência que embora equivocada sob o ponto de vista das mais recentes tendências filosóficas ainda permanece como a característica principal da experimentação dentre parte considerável do corpo docente de Ensino Fundamental e Médio (Galiazzi, 2001, p.253). Também procuramos explorar os elementos capazes de caracterizar melhor o papel que a experimentação tem enquanto dimensão constitutiva do Ensino de Ciências. Nesse caso, se faz necessário deixar clara a distinção entre a experimentação enquanto pesquisa e enquanto ensino de ciências. A concepção equivocada de

"Método Científico" que o Ensino de Ciências tradicional solidifica cada vez mais é um dos reflexos dessa confusão.

No segundo capítulo procuramos situar o Ensino de Ciências destacando a experimentação como elemento constituinte da formação de uma cultura científica. Para isso a articulação entre a pedagogia dialógica e libertadora de Paulo Freire e a epistemologia histórico-crítica de Gaston Bachelard será um elemento chave capaz de subsidiar nosso trabalho. Buscamos no emprego do experimento não reforçar as tendências empirista-indutivistas que ainda resistem entre boa parte dos professores (Borges, 2002,p.297), e que sistematicamente contribuem para a caracterização de um método científico que se mostra totalmente caricatural. Buscamos sim, encontrar no experimento, elementos capazes de otimizar a dialogicidade de Freire e a noção de ruptura e de obstáculo epistemológico de Bachelard. E dessa forma empregar a experimentação como porta de entrada para o processo de formação de uma cultura científica.

O terceiro capítulo dá subsídios para o nosso trabalho, e tem como tônica os aspectos teóricos e práticos que envolvem a reconstituição de experimentos históricos, nesse caso, elementos como limitações e potencialidades são explorados através de três ferramentas que embora sejam pertinentes à dimensão experimental são de natureza absolutamente distinta: as experiências reais; as experiências de pensamento e as simulações computacionais.

No quarto capítulo, como exemplo dessa articulação, propomos o resgate de dois experimentos históricos. Nesse caso a obra de Galileu Galilei "Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas Novas Ciências" (1638) fornece subsídios importantes não apenas como fonte dos experimentos históricos, mas por trazer à tona elementos que esse trabalho se propõe a abordar.

No quinto capítulo procuramos sistematizar os conceitos e conhecimentos históricos resgatados no capítulo anterior de forma a explorar as categorias que discutimos nos três primeiros capítulos. Esse trabalho se materializou em um conjunto de dez simulações de computador que são abordadas em tópicos cujo nome é o mesmo dos arquivos a que se referem. Essas simulações, voltadas para o contexto de trabalho de um professor em turmas de Ensino Médio, buscam, não apenas servir de elemento motivacional no processo de ensino, mas sim explorar alguns aspectos da experimentação como uma dimensão indissociável da ciência, quer no contexto da pesquisa ou do ensino. Acreditamos assim, que o emprego desse material à luz dos conceitos trabalhados no corpo desse trabalho e em especial os do capítulo 2, poderá contribuir no processo de formação de uma cultura científica.

CAPÍTULO 1 – A EXPERIMENTAÇÃO NO ENSINO DE CIÊNCIAS

1.1 – Um lugar para a experimentação

É consenso que o emprego da experimentação é uma ferramenta fundamental no Ensino de Ciências (Galiazi, 2001,p.250), embora atividades pedagógicas envolvendo aspectos experimentais sejam normalmente pouco freqüentes no ambiente escolar (Galiazi, 2001, p.250; Barbosa, 1990, p.106; Atx, 1991, p.79 e 82). São diversificadas as razões elencadas como tentativa de explicação dessa realidade, variando das limitações na formação do professor, passando pelas inúmeras dificuldades características da nossa realidade escolar e até mesmo tangenciando aspectos referentes à carga horária atualmente dedicada às aulas de ciências. Ainda quando empregada, o que se identifica é a falta de uma ligação clara e definida com os conteúdos de ensino trabalhados (Barbosa, 1990,p.106; Atx, 1991,p.82; Borges, 2002,p.296) tornando a experimentação apenas mais uma das inúmeras tarefas que compreendem o ensino.

Percebemos na experimentação um elemento importante para o ensino de ciências uma vez que a experimentação é também uma dimensão dessa própria ciência. Dessa forma, buscamos a experimentação como uma das técnicas capazes de propiciar ao aluno eficiência na construção e aprendizagem de conceitos e de “modelos científicos” e não simplesmente como um elemento de motivação para os alunos (Barbosa, 1999, p.106). Araújo, abordando as atividades experimentais sob diferentes enfoques com base na análise de artigos relativos ao tema identifica algumas das principais tendências dos trabalhos acerca da utilização da experimentação no Ensino Médio, segundo ele são: Demonstração; Verificação e Investigação

(Araújo, 2003). Como uma das tendências mais utilizadas, a demonstração incorpora elementos empírico-indutivistas e desconsidera a dinâmica de construção do conhecimento científico que, embora incorporando aspectos empíricos, não reconhece neles exclusividade constitutiva da ciência. Entretanto entendemos que a dimensão empírica das ciências naturais, que a experimentação representa, tem um papel relevante no processo de produção de novos conhecimentos e, neste sentido, todo e qualquer trabalho pedagógico com a ciência deve considerá-lo.

Para Georges Snyders, no processo de Ensino de Ciências é possível identificar dois importantes instantes que embora antagônicos contribuem para o seu desenvolvimento: a ruptura e a continuidade (Snyders, 1988). Esses instantes representam não apenas, epistemologicamente, a essência do desenvolvimento científico, mas também um par sempre presente no processo de ensino/aprendizagem de ciências. Ao exemplificar com algumas questões que poderia surgir em uma experiência de queda de corpos de pesos diferentes, ele diz:

> O aluno considera muito freqüentemente, pelo menos no início, que a experiência está apenas destinada a reafirmar suas concepções ou a persuadir os outros. Quando a experiência contradiz a evidência do que se acreditava, ele resiste tão obstinadamente à recolocação da questão que prefere criticar os instrumentos, o modo pelo qual foram utilizados: mediu-se mal ou mediu-se de alturas de queda muito baixas etc. (Snyders, 1988, p.102).

Nesse caso, percebe-se o conflito cognitivo do sujeito frente a um novo obstáculo. Essa situação se bem orientada pelo professor pode conduzir a um aprimoramento dos modelos do aluno de forma a aproximá-lo dos conceitos cientificamente aceitos. Desta forma, a utilização do método experimental é de grande valia para a promoção desses instantes de ruptura e continuidade, na medida que é um evento que sendo bem trabalhado é repleto de significados e aplicações. Snyders lembra ainda, do obstáculo que o simples bom senso e a observação comum representam ao conhecimento, pois os erros tornam-se consistentes e solidários entre si, gerando uma estrutura difícil de ser modificada. Daí a necessidade de instituir o que chamou de "psicanálise dos erros iniciais". O autor caracteriza ainda a experimentação como um elemento na convergência entre as práticas e o pensamento teórico, responsável pela satisfação e alegria, tema recorrente de seu livro. Sobre isso ele nos diz:

> Alegria de agir sobre os objetos, de experimentar, isto é de colocar suas idéias à prova dos fatos, aperceber-se de seus erros e ter confiança que se pode retificá-los; os fenômenos familiares colocam-se em ordem, as noções integram-se, ligam-se em conjuntos estruturados, ao mesmo tempo que se vai à uma convergência entre as práticas e o pensamento teórico: esse sentimento de unidade conduz o indivíduo à satisfação, enquanto que a distorção, a fragmentação suscitam ao contrário dor, até mesmo culpabilidade. (Snyders, 1988, p.99).

As idéias de Snyders vão ao encontro de Delizoicov que vê nas atividades experimentais uma garantia de que a relação teoria-prática não seja transformada em uma dicotomia. O que não significa manter o direcionamento de emprego da experimentação como simples ferramentas de demonstração e verificação (Delizoicov, 1994). Sobre isso ele nos diz:

> Considera-se mais conveniente um trabalho experimental que dê margem à discussão e interpretação de resultados obtidos (quaisquer que tenham sido), com o professor atuando no sentidos de apresentar e desenvolver certos conceitos, leis e teorias envolvidas na experimentação. Dessa forma o professor será um orientador crítico da aprendizagem, distanciando-se de uma postura autoritária e dogmática no ensino e possibilitando que os alunos venham a ter uma visão mais adequada do trabalho em ciências. Se essa perspectiva da atividade experimental não for contemplada, será inevitável que se resuma à simples execução de "receitas" e à comprovação da "verdade" daquilo que repousa nos livros didáticos. (Delizoicov, 1994, p.22).

Entendemos que além de "provar" ou "demonstrar" leis e teorias as atividades experimentais são importantes por representarem uma dimensão da própria ciência, dimensão essa que normalmente ou é suprimida, ou apresentada em um modelo caricatural conhecido como método científico. Em ambos os casos é possível perceber a ineficácia do ensino no sentido de atingir os objetivos de formação e apreensão de conhecimentos básicos em ciências. Dessa forma propomos o emprego de atividades experimentais vinculadas à história da ciência por acreditarmos serem capazes de levantar questões e assim explorar elementos que evidenciem o papel da experimentação na ciência. Situando assim a dimensão empírica que a experimentação representa como uma dimensão constitutiva da ciência.

1.2 – A experimentação e o Método Científico

A idéia equivocada do método científico como um algoritmo infalível, capaz de produzir um conhecimento inquestionável através de observações, formulação de hipóteses, comprovação experimental e conclusão caracterizam a concepção empirista-indutivista da ciência (Borges, 2002, p.297). Essa visão do método científico, embora rejeitada pelos filósofos da ciência, permanece presente no ensino de ciências (Galiazzi, 2001, p.253; Silva, 2000, p.129; Silveira, 2002, p.7) o que pode levar a uma descaracterização do papel da experimentação enquanto dimensão constitutiva da ciência. Essa concepção pode sugerir aos professores e estudantes que as atividades práticas experimentais são da mesma natureza e têm a mesma finalidade que as atividades experimentais e de observação que os cientistas fazem em seus laboratórios de pesquisa. O que é errado, pois são atividades bem distintas e com diferentes objetivos (Borges, 2002, p.297).

Em Silveira, a concepção empirista-indutivista da ciência é questionada como ferramenta de ensino de ciências em um artigo que mostra a insustentabilidade da proposta indutivista de "Descobrir a lei a partir de resultados experimentais". Tanto na esfera do ensino de ciências como da própria pesquisa científica (Silveira, 2002).

> No séc XX,[...], vários epistemólogos e historiadores da ciência e cientistas negaram que o conhecimento científico possa ser derivado apenas de observações. Einstein reconheceu em suas notas autobiográficas, que na formulação da Teoria da Relatividade andou por caminhos muito distantes daqueles apontados pelos empiristas. (Silveira, 2002, p.13).

O mesmo autor critica ainda, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) para as ciências naturais de 5ª a 8ª série, divulgados em 1998 pelo Governo Federal com relação à postura tímida e pouco fundamentada a respeito do ensino do método científico nas escolas:

"[...] os PCN reconhecem que é impreciso definir as etapas de um método científico e igualmente significativo para todas as ciências e suas diferentes abordagens [..]." (Brasil,1998 apud Silveira, 2002,p.10). Infelizmente, embora já a algumas décadas com o trabalho de epistemólogos e historiadores da ciência a concepção empirista-indutivista seja questionada, um estudo com 289 professores formados e em formação, mostrou que a imagem de ciência predominante é a empirista-indutivista (Silveira, 2002, p.9). Essa visão nos contextos escolares centradas na idéia que observações e medidas, seguidas de posterior generalização, decorrem diretamente as teorias e leis universais retrata uma concepção positivista[1] e simplista da ciência (Silva, 2000, p.127-129).

Nesse caso o "contexto da descoberta e da justificação", no sentido de (Pietrocola, 2005,p.80), deveria ser explorado, parece que a imagem que é transmitida pela ciência é extremamente baseada no formalismo e rigor de método da justificativa (conjunto de critérios que validam ou não um modelo novo). No entanto a história nos mostra que, na maioria esmagadora dos casos, a ciência se desenvolveu seguindo caminhos, não tão claros. Aspectos como a intuição e a causalidade surgem de forma sistemática e não podem ser desconsiderados do processo de ensino de ciências.

Reforçando essa imagem distorcida que a ciência parece ter, Sheldrake mostra que os filósofos tendem a idealizar o método experimental, como os próprios cientistas (Sheldrake, 1995,p.141). Baseando-se em um estudo sobre a fraude e da ilusão em ciências ele percebe que a realidade era bem mais pragmática e empírica e em muito se distancia do chamado método científico:

> Como a ciência é um processo social, cada experimentador procura, ao mesmo tempo, progredir e obter aceitação para as suas próprias fórmulas, sua própria interpretação da matéria. [...] A ciência é um processo complexo no qual o observador pode ver quase tudo o que deseja, desde que aperte

[1] O positivismo sob a ótica da construção do saber científico tem como principais características: empirismo; objetividade; experimentação; validade. (Laville, 1999, p.27)

> suficientemente os olhos. [...] Os cientistas são pessoas, têm estilos diferentes e diferentes abordagens de verdade. O estilo homogêneo dos escritos científicos, que parece fruto do método científico universal, não passa de uma falsa unanimidade imposta pelas convenções vigentes do texto científico. Se os cientistas pudessem expressar-se naturalmente ao descrever seus experimentos e teorias, o mito de um método científico único e universal provavelmente se esfumaçaria num passe de mágica. (Broad, 1985 apud Sheldrake, 1995,p.141).

Percebemos então que o educador deve ter muito cuidado ao empregar a experimentação sob o risco de contribuir para formação e ou solidificação de modelos que não correspondem à realidade da ciência e que fatalmente culminarão em um aprendizado equivocado e ineficiente.

1.3 – O Método da Descoberta

Até aqui procuramos deixar clara a distância entre a experimentação no contexto da pesquisa e do ensino de ciências, entretanto não podemos deixar de mencionar o modelo de ensino denominado método da descoberta justamente por pregar um ensino de ciências que se "inspira" na forma como as descobertas científicas ocorrem. Essa metodologia de ensino passou a ser implementada no fim da década de 1950 e com ela a atividade experimental tinha como meta prioritária propiciar a redescoberta da ciência, de seus princípios, de suas leis (Gaspar, 2003, p.12). Segundo esse autor:

> Propunha-se atividades abertas, ou seja, que não fixam objetivos explícitos e bem determinados. Esperavam que bastaria a observação de fenômenos experimentais para que os alunos, quase sempre trabalhando em grupos, fossem levados a redescobrir as leis ou princípios científicos que descreviam ou explicavam esses fenômenos. A idéia era reproduzir, na sala de aula ou no laboratório, o que alguns pedagogos e cientistas entendiam ser o método da descoberta. (Gaspar, 2003, p.12).

Esse projeto teve pouco alcance e a principal causa desse equívoco epistemológico é a compreensão errônea de como ocorrem as descobertas científicas, pois para os que propõem o método da redescoberta: "a experimentação é a origem da descoberta. Portanto, faz-se a experiência sem saber o que resultará dela, e a observação atenta do que acontece é a origem da formulação das leis científicas". (Gaspar, 2003, p.12). E embora alguns educadores ainda defendam esse método como o mais adequado à compreensão da origem das descobertas no campo da ciência, ele não resiste a uma reflexão mais cuidadosa. (Gaspar, 2003, p.12; Atx, 1991, p.80)

O método da descoberta peca por considerar que a simples colocação do sujeito frente ao problema, munido dos elementos necessários à sua resolução é condição suficiente para a descoberta e o conseqüente aprendizado (Atx, 1991, p.80; Barros, 1998, p.83). Não propomos de forma nenhuma que se repitam os erros do método da descoberta, mas é importante frisar que a história da ciência mostra que várias descobertas científicas seguiram um caminho análogo.

1.3.1 – Serendipdade - *serendipity*

> *Dans les champs de l'observation, le hasard ne favorise que les espirits prepares*. (No campo da observação, o acaso favorece apenas o espírito preparado). (Pasteur, 1854 apud Kuhn, 1977, p.252).

Essa frase de Louis Pasteur (1822-1895) mostra que uma descoberta pode estar atrelada a combinação de dois eventos: a ocorrência de uma situação ideal para que um fenômeno ocorra e a capacidade observacional do descobridor. Nesse caso, o termo serendipdade pode ser empregado. O termo foi recentemente descoberto e está sendo usado com crescente freqüência, derivado do inglês; "*serendipity* - [serend'ipiti] s. serendipismo m.: dom de fazer descobertas felizes, por acaso" (Michaelis, 1994). Esse termo é largamente empregado por (Roberts, 1995) ao abordar algumas descobertas acidentais em ciências. Nesse trabalho, o autor discorre sobre inúmeros casos de descoberta que ocorreram na Física, Química, Biologia, Geologia, Arqueologia e na indústria em geral, graças ao que denomina de serendipdade. São alguns exemplos:

Tabela 1.1 – Descobertas acidentais em ciências (Roberts, 1995)

Ano	Experimento
1820	O físico dinamarquês **Hans Cristian Oersted** descobre o eletromagnetismo
1838	**L. J. M. Daguerre** descobre um processo fotográfico eficiente
1870	O químico **Felix Hoffman** descobre o acido acetilsalicílico (aspirina)
1895	O físico alemão **Wilhelm Conrad Röntgen** descobre os raios X
1978	O astrônomo **James Christy** descobre Caronte, a lua de Plutão

Pasteur, como outros grandes beneficiários da serendipidade, reconheceu a diferença entre um acidente e uma descoberta acidental e expressou isso eloqüentemente ao dizer que “No campo da observação, o acaso favorece apenas o espírito preparado” (Pasteur, 1854 apud Roberts, 1995,p.89). A figura abaixo extraída de um periódico voltado ao público leigo sobre o mesmo tema ilustra de forma caricatural um possível evento de descoberta serentíptica.

Figura 1.1 – O botânico à procura de uma planta rara pode topar sem querer com a ossada de um dinossauro (Carvalho, 1990, p.64)

Roberts lembra ainda que, embora a curiosidade e a percepção possam variar de pessoa para pessoa, elas podem ser incentivadas e desenvolvidas como sugere Ronald S. Lenox no seu artigo: “Educando para a Descoberta Serendíptica” (Journal of Chemical Education, vol. 62, 1985, p.282), Nesse artigo são descritas várias maneiras pelas quais os estudantes podem se preparar para aproveitar acidentes fortuitos (Roberts, 1995,p.301).

Esse tipo de descoberta científica só é possível graças à capacidade de compreensão do observador. Qualquer desses acidentes poderia ter passado desapercebido e, logo, teriam permanecido como um simples acidente sem importância. Embora esse tipo de desenvolvimento fuja dos padrões da ciência, não podemos desconsiderá-lo por dois motivos: na esfera do ensino de ciências por ser uma metodologia extremamente limitada e na esfera da pesquisa por ir de encontro ao chamado "Método Científico". Kuhn ao caracterizar a descoberta dos raios X por Röntgen como um caso clássico de descoberta por acidente, diz: "Esse tipo de descoberta ocorre mais freqüentemente do que os padrões impessoais dos relatórios científicos nos permitem perceber" (Kuhn, 2003,p.83).

CAPÍTULO 2 – A DIMENSÃO EMPÍRICA DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO SOB A ÓTICA DE REFERENCIAIS PEGAGÓGICO E EPISTEMOLÓGICO

2.1 – A Pedagogia Dialógica e Libertadora de Paulo Freire

Quem ensina aprende ao ensinar e
quem aprende ensina ao aprender
- Paulo Freire -

É pressuposto deste trabalho que a educação científica concebida em consonância com uma proposta de educação dialógica e libertadora, aquela preconizada por Paulo Freire, deve estar a serviço da formação de uma cultura científica. Nesta perspectiva, o educando é percebido enquanto sujeito da ação educativa e não como mero objeto passivo desta, à maneira do que Freire denominou de "educação bancária", cuja prática educacional se caracteriza por ações de depósito, transferência, transmissão de valores e conhecimentos. Na educação bancária, as relações educador-educando são fundamentalmente "narradoras" e dissertativas" e se caracterizam pela "sonoridade" da palavra em detrimento da sua dimensão real de transformação. Segundo Freire,

> Este é um modo estático, verbalizado de entender o conhecimento, que desconhece a confrontação com o mundo como a fonte verdadeira do conhecimento, nas suas fases e nos diferentes níveis, não só entre os homens, mas também entre os seres vivos em geral. (Freire, 1971, p. 27).

Ao contrário do que propõe a educação bancária, Freire nos remete a uma proposta educacional "libertadora", que tem no "Diálogo" o elemento essencial e norteador das relações educador-educando e no processo de "conscientização"[2] o seu maior objetivo. Trata-se, portanto, de uma pedagogia que, como afirma Freire, se confunde com um método de conhecimento, em si mesmo dialógico e libertador.

Em "Extensão ou Comunicação"(Freire, 1971) fomos buscar uma reflexão de caráter filosófico em torno do conhecimento, que nos permitisse redimensionar a perspectiva de análise do "saber escolar" e conseqüentemente do Ensino de Ciências. Segundo Freire, o conhecimento:

> Exige uma presença curiosa do sujeito em face do mundo. Requer sua ação transformadora sobre a realidade. Demanda uma busca constante. Implica em invenção e em reinvenção. Reclama a reflexão crítica de cada um sobre o ato mesmo de conhecer, pelo qual se reconhece conhecendo e ao reconhecer-se assim percebe o "como" de seu conhecer e os condicionantes a que está submetido seu ato. (Freire, 1971, p. 27).

Para Freire "todo conhecimento é uma co-operação" (Freire, 1971, p. 36), que tem no diálogo sua estrutura fundamental. Assim é que o homem, enquanto um "ser em situação", encontra nas relações que estabelece com o mundo o ponto de partida de todo conhecimento. Estamos, portanto, diante de uma concepção onde o conhecimento é percebido em sua natureza "construtiva", como resultado de uma elaboração do pensamento, de uma ação do sujeito frente à realidade na qual está inserido, que lhe reclama transformação e que é por ele apreendida num processo dialógico consigo mesmo e com o mundo. Para Freire:

> No momento mesmo em que pesquisa, em que se põe como um sujeito cognoscente frente ao objeto cognoscível, não está senão aparentemente só. Além do diálogo invisível e misterioso que estabelece com os homens que, antes dele, exerceram o mesmo ato cognoscente, trava um diálogo consigo mesmo. Põe-se diante de si mesmo. Indaga, pergunta a si mesmo. (Freire, 1971, p.79).

---

[2] A idéia de "*conscientização*" está aqui referida a uma leitura da realidade que busca o entendimento dos fatos como estes se dão na existência empírica, nas suas relações e circunstâncias. Trata-se, portanto, de superar o olhar mágico e ingênuo do real, fundado numa visão estática das coisas para instaurar no nível da consciência o questionamento, a dúvida, a ação.

Neste sentido, estratégias didático-pedagógicas fundadas na explicitação da dimensão histórica do conhecimento podem desempenhar um importante papel, ao exporem o sujeito cognoscente a uma realidade que já foi mediadora de outros diálogos e, portanto, de processos de conhecimento, em outras épocas.

Em "Pedagogia do oprimido" encontramos elementos que guardam estreita ligação com o nosso objetivo, pois defende uma pedagogia libertadora e de forma análoga defendemos um Ensino de Ciências capaz de libertar e desenvolver o espírito científico dos alunos. Em ambos os casos o conhecimento das concepções primeiras é um elemento vital no processo de estabelecimento desse diálogo. O professor surge com um papel ímpar, pois nesse círculo de cultura que se busca estabelecer o professor deve ter um papel de coordenador cuja função é fornecer as condições favoráveis à dinâmica de grupo.

Como uma das dimensões da Educação Bancária, Paulo Freire identifica ainda o que chama de "Educação Dissertadora" a qual minimiza ao máximo a participação do educando, colocando-o como mero receptor de informações, sobre esse tipo de educação, ele nos diz:

> Nela, o educador aparece como seu indiscutível agente, como seu real sujeito, cuja tarefa indeclinável é "encher" os educandos dos conteúdos de sua narração. Conteúdos que são retalhos da realidade desconectados da totalidade em que se engendram e em cuja visão ganhariam significação. A palavra nessas dissertações se esvazia da dimensão concreta que devia ter ou se transforma em palavra oca, em verbosidade alienada e alienante. Daí que seja mais som que significação e, assim, melhor seria não dize-la. (Freire, 1975, p.65)

Essa educação dissertadora tem como característica principal a sua sonoridade e não o caráter de transformação, ele nos lembra ainda de frases Onde o educando fixa, memoriza, mas não reflete, e que certamente ouvimos no passado como: "Quatro vezes quatro, dezesseis; Pará, capital Belém... Desta maneira, a educação se torna um ato de depositar, em que os educandos são depositários e o educador o depositante" (Freire, 1975, p.66). O Ensino de

Ciências, às vezes, incorre nesse mal, a educação bancária se manifesta também na forma clássica da 2ª Lei de Newton:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \qquad \textbf{(2.1)}$$

A sonoridade da expressão: força é igual a massa vezes a aceleração é incontestável, entretanto na maioria dos casos não passa de um "depósito" na estrutura cognitiva dos alunos que podem recitá-la mas são incapazes de compreender plenamente o seu papel e a sua força como instrumento da ciência.

Como forma de corrigir esse quadro, ao contrário de uma "Educação Bancária" Freire sugere uma "Educação Problematizadora" que se faria através de um esforço permanente onde o homem vai percebendo criticamente, como *estão sendo* no mundo *com que* e *em que* se acham.

> Nesse sentido, a educação libertadora, problematizadora, já não pode ser o ato de depositar, ou de narrar, ou de transferir, ou de transmitir "conhecimentos" e valores aos educandos, meros pacientes, à maneira da educação bancária, mas um ato cognescente. Como situação gnosiológica, em que o objeto cognoscível, em lugar de ser o término do ato cognescente de um sujeito, é o mediatizador de sujeitos cognoscentes, educador de um lado, educandos de outro, a educação problematizadora coloca, desde logo, a exigência da superação da contradição educador-educandos. Sem esta, não é possível a relação dialógica, indispensável à cognoscibilidade dos sujeitos cognoscentes, em torno do mesmo objeto cognoscível. (Freire, 1975, p.78).

Essa educação problematizadora apoiada no diálogo educador-educando fornece elementos para a formação de um discurso horizontal capaz de levar à formação do homem dialógico de Freire. Um homem crítico, consciente do seu poder de criação e de transformação. Sobre o processo que leva à formação desse homem Freire nos diz:

> Ao fundar-se no amor, na humildade, na fé nos homens, o diálogo se faz numa relação horizontal, em que a confiança de um pólo no outro é conseqüência óbvia. Seria uma contradição se, amoroso, humilde e cheio de fé, o diálogo não provocasse este clima de confiança entre seus sujeitos. Por isso inexiste esta confiança na antidialogidade da concepção bancária da educação. (Freire, 1975, p.96).

Essa relação horizontal do diálogo que gera a comunicação é tema recorrente na obra freiriana e se opõe ao discurso vertical representado pelo bancarismo ou pelo extensionismo já discutido. A figura abaixo ilustra essa idéia através da interação entre o educador “A” e o educando “B” nos discurso vertical (fig-2.1a) e horizontal (fig-2.1b)

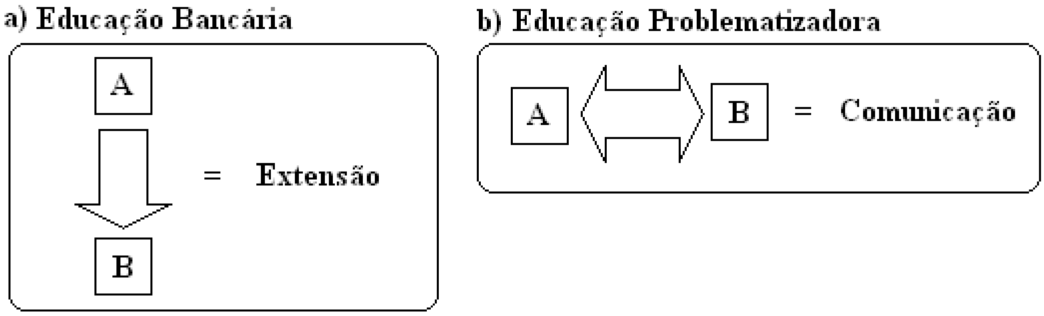


Figura 2.1 – Extensão & Comunicação

No diálogo horizontal temos chance de formar um pensar crítico que interage nesse mesmo diálogo de forma a realimentá-lo num processo cíclico. “Somente o diálogo, que implica num pensar crítico, é capaz, também de gerá-lo”. (Freire, 1975, p.98).

No nosso trabalho, buscaremos abordar a experimentação como elemento de mediação, capaz de permitir que o diálogo horizontal de Freire possa se manifestar entre o alunos e os elementos que se relacionam ao Ensino de Ciências. Esses elementos podem ser os seus colegas, o professor, as pessoas que realizaram esse experimento no passado e, em última instância, ele próprio.

2.2 – A Epistemologia Histórico-Crítica de Gaston Bachelard

Em física, como em trigonometria, é preciso estabelecer uma base firme de todas as suas operações.

- Gaston Bachelard -

A base epistemológica a partir da qual buscamos uma aproximação ao pensamento de Paulo Freire é a epistemologia histórico-crítica de Gaston Bachelard, que explicita a dinâmica do processo de construção do conhecimento científico. Os conceitos de Ruptura e Obstáculo Epistemológico são elementos recorrentes da epistemologia Bachelardiana, segundo a qual a ciência deve ser caracterizada epistemologicamente como um domínio de pensamento que promove uma ruptura com o conhecimento vulgar. Neste sentido, não só ela é um conhecimento diferente do conhecimento que nos fornece a opinião, mas só pode existir ao preço de uma ruptura epistemológica com a mesma. Segundo ele,

> A ciência, tanto por sua necessidade de coroamento como por princípio, opõe-se absolutamente à opinião. Se, em determinada questão, ela legitimar a opinião, é por motivos diversos daqueles que dão origem à opinião; de modo que a opinião está, de direito, sempre errada. A opinião **pensa** mal; não **pensa**: **traduz** necessidades em conhecimentos. Ao designar os objetos pela utilidade, ela se impede de conhecê-los. Não se pode basear nada na opinião: antes de tudo, é preciso destruí-la. Ela é o primeiro obstáculo a ser superado (Bachelard, 1986, p.14, grifo do autor).

Diante desse mundo epistemologicamente novo, fruto de todo desenvolvimento da ciência, é que devemos procurar as razões do nosso conhecimento. Neste sentido, os conceitos de ruptura e obstáculo epistemológico são essenciais. O termo “ruptura” é usado na epistemologia de Bachelard para indicar uma descontinuidade entre o conhecimento comum e o conhecimento científico e também, no interior da ciência, para caracterizar a passagem de um ciclo evolutivo para outro. Os obstáculos epistemológicos surgem como elementos próprios do processo de conhecimento, que se encrustam num conhecimento não questionado. Eles são, segundo Bachelard,

> Lentidões e perturbações que, por uma espécie de necessidade funcional, causam inércia, estagnação e regressão no ato do conhecimento. [...] Não se trata de obstáculos externos, como a complexidade ou a fugacidade dos fenômenos, nem tampouco internos como a fraqueza dos sentidos e do espírito humano [...]. Trata-se antes, de um impedimento que aparece no ato mesmo de conhecer. É antes uma espécie de resistência implantada previamente, de tal modo que o conhecimento sempre se faz contra um conhecimento anterior. Conhecer seria destruir conhecimentos mal feitos, superando o que constitui no próprio espírito, obstáculo à espiritualização. (Bachelard, 1986, p.19).

Os obstáculos epistemológicos podem ser estudados no desenvolvimento histórico do pensamento científico, e de sua superação também depende a formação de uma cultura científica. Na epistemologia bacherladiana, também a opinião ocupa um lugar de destaque, na medida que se apresenta como o primeiro obstáculo a ser superado. Superação essa, imprescindível para a formação do espírito científico. Dentre os inúmeros trabalhos seguindo a linha de pesquisa sobre as concepções alternativas que vem sendo conduzidos nas últimas décadas encontramos um bom exemplo de como a opinião funciona com obstáculo ao conhecimento em um artigo de Maria J. B. Almeida. Nesse artigo a autora aborda a baixa compreensão de termos científicos no discurso da ciência, e no qual chega à conclusão que a causa da baixa compreensão desses termos tem alta correlação com o fato dos alunos acharem já conhecer o significado dos termos, o que ainda segundo a autora é um obstáculo ao aprendizado dos mesmos (Almeida, 2001). A pergunta se faz necessária para o aprendizado, pois é capaz de despertá-lo para a construção que desejamos. Na obra de Bachelard, a compreensão do sentido que o problema tem como ferramenta de ruptura dá subsídio à caracterização do espírito científico. A esse respeito, ele diz:

> O espírito científico proíbe que tenhamos opinião sobre questões que não compreendemos, sobre questões que não sabemos formular com clareza. Em primeiro lugar, é preciso saber formular problemas. E digam o que disserem, na vida científica os problemas não se formulam de modo espontâneo. É

> justamente esse sentido de problema que caracteriza o verdadeiro espírito científico. **Para o espírito científico, todo conhecimento é resposta a uma pergunta**. Se não há pergunta, não pode haver conhecimento científico. Nada é evidente. Nada é gratuito. Tudo é construído. (Bachelard, 1996,p.18, grifo nosso).

Nesse processo, a pergunta é de fundamental importância, mas não qualquer pergunta, ela não pode ser abstrata e fraca, pois assim tende a tornar-se um novo obstáculo: "Um obstáculo epistemológico se incrusta no conhecimento não questionado" (Bachelard, 1996,p.19). Nessa tentativa de superação dos obstáculos epistemológicos a experiência tem também um papel importantíssimo. Mesmo porque ela própria pode vir a ser um obstáculo a se superar.

> Na formação do espírito científico, o primeiro obstáculo é experiência primeira, a experiência colocada antes e acima da crítica – crítica esta que é, necessariamente, elemento integrante do espírito científico. Já que a crítica não pôde intervir de modo explícito, a experiência primeira não constitui, de forma alguma, uma base segura. (Bachelard, 1996,p.29).

Essa experiência que se coloca acima da crítica é falha, mas ao mesmo tempo é carregada de facilidades cognitivas e se fixa como verdadeira na mente do aprendiz. Bachelard caracteriza esse obstáculo e mostra que há ruptura e não continuidade entre a experiência primeira e a experiência científica.

> A primeira experiência, ou para ser mais exato a observação primeira é sempre um obstáculo inicial à cultura científica. De fato, essa observação primeira se apresenta repleta de imagens; é pitoresca, concreta, natural, fácil. Basta descrevê-la para se ficar encantado. Parece que a compreendemos. (Bachelard, 1996,p.25).

A idéia de ruptura é reforçada pelo fato da experiência científica contradizer a experiência comum não sendo de forma nenhuma um simples aperfeiçoamento desta.

> A experiência científica é, portanto uma experiência que contradiz a experiência comum. Aliás, a experiência imediata e usual sempre guarda uma espécie de caráter tautológico, desenvolve-se no reino das palavras e das definições; falta-lhe precisamente esta perspectiva de erros retificados que caracteriza, a nosso ver, o pensamento científico. A experiência científica não é de fato construída; no máximo; é feita de observações justapostas, e é surpreendentemente que a antiga epistemologia tenha estabelecido um vínculo contínuo entre a observação e a experimentação, ao passo que a

> experimentação deve-se afastar das condições usuais de observação. Como a experiência comum não é construída, não poderá ser, achamos nós, efetivamente verificada. Ela permanece um fato. Não pode criar uma lei. Para confrontá-la com vários e diferentes pontos de vista. Pensar uma experiência é, assim, mostrar a coerência de um pluralismo inicial. (Bachelard, 1996,p.14).

Embora, epistemologicamente, os nossos apontamentos sinalizem na direção da necessidade de uma superação da experiência comum, a experiência científica tende a não romper totalmente com a experiência comum, pelo menos no que tange a aspectos cognitivos. É notória a idéia dentre as modernas teorias de aprendizagem de que o educador não deve considerar o educando uma tábua rasa sobre a qual pode derramar os seus conhecimentos e que estes irão se solidificar aí, mesmo que se houverem conhecimentos prévios estes poderão ser integralmente substituídos (Moreira, 1999), sobre isso Bachelard nos diz: “Parece que nenhuma experiência nova, nenhuma crítica pode dissolver certas afirmações primeiras. No máximo, as experiências primeiras podem ser retificadas e explicitadas por novas experiências” (Bachelard, 1996,p.52).

Isso confirma a necessidade de conhecer as concepções primeiras dos alunos, até mesmo porque embora para muitos pesquisadores não seja uma regra, em alguns casos é possível perceber uma estreita ligação entre essas concepções e os primórdios do desenvolvimento científico ratificando assim a tese de Thomas Kunh de que: “A ontogenia cognitiva recapitula a filogenia científica” (Kunh, 1977 apud Matthews, 1995,p.178).

No nosso trabalho, buscaremos abordar a experimentação como elemento capaz levantar novos questionamentos e assim proporcionar um contexto que traga à tona inconsistências solidificadas pelo senso comum o que pode permitir a ocorrência das rupturas e a quebra de obstáculos epistemológicos encaminhando assim o indivíduo no processo de formação de um espírito científico.

2.3 – A formação de uma Cultura Científica

Ao nos referirmos a uma “cultura científica” queremos com essa expressão representar um conjunto de conhecimentos, atitudes, percepções que tomam a ciência como instrumento mediador do nosso diálogo com o mundo. Isso implica, por um lado, a apreensão de certos conceitos construídos no âmbito da ciência, assim como em uma análise crítica sobre o processo de desenvolvimento desses conceitos, o que significa explicitar reflexões acerca da natureza da ciência. Segundo Masserani, durante os últimos anos houve uma onda internacional de preocupações com as relações entre a ciência e a cultura geral. Diferentes termos como “compreensão pública da ciência” (Inglaterra); “alfabetização científica” (Estados Unidos) ou “cultura científica” (França) tem em comum o fato de defenderem que as pessoas não-cientistas que vivem em uma cultura científica devem saber um pouco sobre ciência (Masserani, 2005,p.14). Estando esse domínio diretamente relacionado ao conhecimento:

- ✓ Dos conteúdos da ciência;
- ✓ Dos processos da ciência;
- ✓ Das estruturas sociais ou instituições da ciência.

Ainda não há consenso sobre quais os conteúdos necessários para compreensão das questões científicas atuais (Masserani, 2005,p.16) e embora na esfera do Ensino de Ciências os mesmo questionamentos possam ser feitos, nos deparamos com a dúvida de como trabalhar os conceitos que atualmente estão em vigor.

A figura 2.2 ilustra a nossa percepção desse processo de formação de uma cultura cientifica, o qual depende diretamente da compreensão dos conceitos científicos e da natureza da ciência. Embora essas duas dimensões se confundam em um único corpo no processo dinâmico que constitui a ciência são por hora apresentadas em separado de forma a dar maior clareza aos recortes que faremos de cada uma.

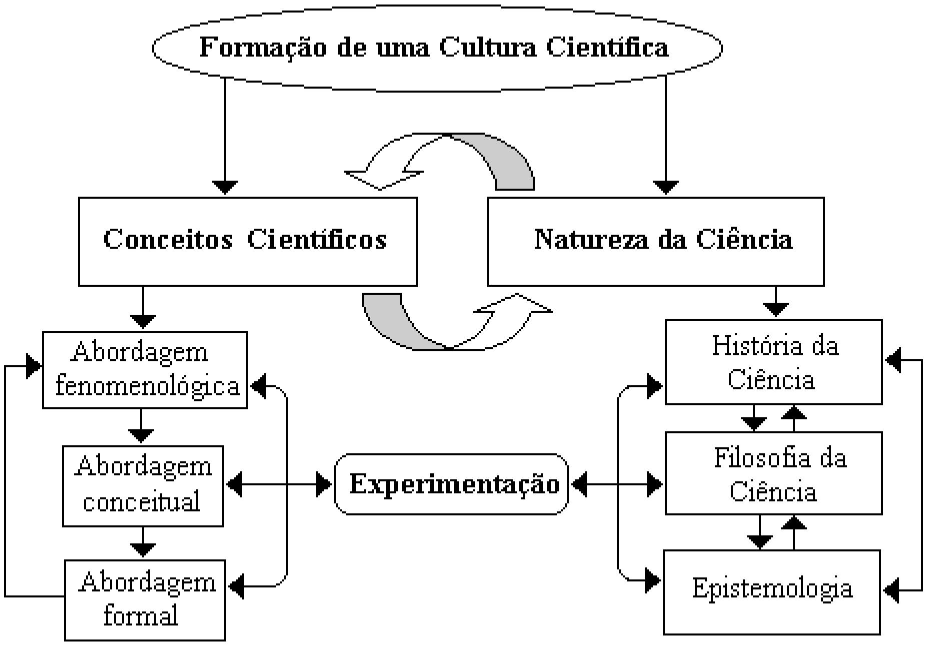


Figura 2.2 – Esquema representativo dos elementos e processos constitutivos de uma Cultura Científica no âmbito do Ensino de Ciências na Educação Básica. Embora inacabado, ele é parte do Núcleo de uma Linha de Pesquisa desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade de Brasília, coordenada pelo Prof. Cássio Costa Laranjeiras.

Nesse diagrama, a interação da natureza dos conceitos científicos e a própria natureza da ciência surgem como importantes elementos da formação de uma cultura científica. No que se refere aos conceitos científicos identificamos como categorias chave as abordagens fenomenológica, conceitual e formal. A fenomenológica é normalmente empregada nos primeiros contatos do indivíduo com a ciência (Ensino Fundamental) e que posteriormente se aprimora através da sistematização de conceitos cientificamente aceitos (Ensino Médio). O passo seguinte a esse processo é o emprego do formalismo matemático sobre os modelos científicos. É importante ressaltar que esse processo não é unidirecional, mas sim cíclico uma vez que o formalismo pode e deve debruçar novamente sobre o fenômeno reinterpretando-o. Esse processo descreve a metodologia que o ensino tradicional insiste em apregoar e que embora coerente falha ao não contemplar a dimensão natureza da ciência no processo de formação de uma cultura científica.

Destacamos ainda, da dimensão natureza da ciência, as categorias que entendemos serem indispensáveis à sua compreensão que são a História da Ciência e a Filosofia da Ciência. Além dessas categorias destacamos também a epistemologia que embora esteja intimamente relacionada às duas anteriores é apresentada em separado, dado o seu importante papel na nossa linha de trabalho. As setas bidirecionais mostram o processo de inter-relação que permeia essas categorias reforçando ainda a idéia de dinamismo que o quadro pode não transmitir. Entendemos que essa segunda dimensão que é normalmente marginalizada é imprescindível a plena construção de uma cultura científica e na tentativa de resgata-la é que propomos o uso de experimentos históricos no ensino de física uma vez que a dimensão empírica que a experimentação representa está presente em todas essa categorias e pode assim servir como um elemento de articulação nesse processo. Dessa forma, a reconstituição de experimentos históricos que propomos será então uma porta de entrada para o processo de formação de uma cultura científica.

Não alheio a esse movimento, Zanetic defende a tese de que “Física também é cultura”, onde dentre outros elementos, dá certa ênfase à um resgate histórico através da exploração dos textos de alguns cientistas que classifica como cientistas de veia literária (Zanetic, 1988,p.12). No nosso caso, vemos esses textos como detentores de enorme riqueza não apenas literária, mas por trazem importantes subsídios físicos no que diz respeito aos experimentos que desejamos reconstituir. No capítulo 4 deste trabalho iremos explorar uma das obras de um destes cientistas com veia literária, Galileu Galilei.

CAPÍTULO 3 – EXPERIMENTOS HISTÓRICOS NO ENSINO DE FÍSICA

> *Um fato mal interpretado por uma época permanece, para o historiador, um fato. Para o epistemólogo, é um obstáculo, um contra-pensamento.*
>
> \- Gaston Bachelard -

3.1 – O Resgate de Experimentos Históricos

Dentre as diferentes estratégias de utilização da história da ciência no ensino, vamos encontrar a utilização de experimentos históricos como àquela que reconhecemos detentora de grande potencial para promover uma adequada articulação da dimensão empírica do conhecimento científico na sala de aula de maneira contextualizada e culturalmente rica. Embora não se possa afirmar com base em resultados de pesquisas a efetividade de tal instrumento, acreditamos que ele pode ser bastante revelador da dinâmica intrínseca do processo de construção e desenvolvimento da ciência.

O Grupo de Pesquisa em Ensino Superior e História da Ciência do Departamento de Física da Universidade de Oldenburg (Alemanha) vem desenvolvendo um projeto, desde 1983, no qual réplicas de instrumentos históricos são disponibilizadas para propostas de ensino. A história da física e a experimentação com experimentos históricos desempenham um papel importante na formação dos licenciandos em física daquela universidade, que atualmente dispõe de um acervo com mais de 40 réplicas, cobrindo diferentes áreas da Física (eletricidade, termodinâmica e ótica). Segundo Höttecke,

> O método de replicação de experimentos históricos torna possível entender a ciência como um trabalho prático que acontece no laboratório. Ele permite aos aprendizes terem uma idéia do significado da experimentação na história da ciência. (Höttecke, 2000, p.344).

A noção de replicação desenvolvida pelo grupo de pesquisa da Universidade de Oldenburg reúne diferentes campos do trabalho historiográfico, envolvendo a pesquisa de textos originais, publicações, diários de laboratório etc., que proporcionam informações de grande relevância acerca de materiais e procedimentos utilizados durante a experiência. Todas essas informações são úteis e necessárias para reconstruir a situação experimental tão exatamente quanto possível. Para Höttecke, "O método de replicação tem que ser concebido como uma ferramenta para entender a ciência, sua natureza e sua história, a partir da perspectiva dos praticantes da ciência" (Höttecke, 2000, p.345).

Neste sentido, é importante considerar a necessidade de que esses experimentos históricos sejam incluídos em seus respectivos contextos históricos, transcendendo assim, a idéia da experimentação como episódio isolado na produção do conhecimento científico[3]. A partir desta estratégia, como afirma Höttecke, "Além da análise de simples textos históricos, a pesquisa nas ciências naturais surge como uma prática humana, que inclui tanto ferramentas intelectuais quanto técnico-manipulativas" (Höttecke, 2000, p.346).

Vale a lembrança de que a dimensão social da prática científica também se explicita na medida em que se percebe que a análise e interpretação dos dados científicos ocorrem sempre mediadas por toda uma comunidade de praticantes da ciência. "Dados que foram obtidos em um experimento tornam-se argumentos em controvérsias científicas" (Höttecke, 2000, p.346). Portanto, longe de se constituir em simples elemento motivacional para o Ensino de Ciências, a experimentação surge aqui, fundamentalmente, como um elemento constituinte da prática científica socialmente construída, representativa da dimensão empírica do conhecimento científico.

---

[3] A utilização de "casos históricos" pode ser uma boa estratégia didático-pedagógica nessa direção. Eles podem ser caracterizados como contextos históricos que apresentam uma idéia unificadora, desenhados com o objetivo de explicitar a dinâmica do processo de construção e desenvolvimento de uma idéia, conceito, teoria, etc. (Stinner, 2003)

3.2 – Experimentos históricos, em busca de uma caracterização

Por "experimentos históricos[4]" entendemos aqueles experimentos realizados e/ou pensados (experiências de pensamento) em um dado contexto histórico e que tiveram um papel significativo na elaboração, definição e/ou solução de um dado problema. Sua utilização é apresentada como uma estratégia para a compreensão da ciência, sua natureza, sua história, a partir da perspectiva dos seus praticantes. A dimensão histórica da atividade experimental e sua relação com o processo de desenvolvimento científico podem nos permitir explicitar o caráter multifacetado da física enquanto ciência natural.

A definição de um experimento histórico é algo difícil, pois remete a idéia de classificação de experiências onde umas seriam mais importantes que outras, o que pode levar a uma idéia de que um desenvolvimento científico que esteja ocorrendo agora, em algum laboratório do mundo, é mais ou menos importante que, por exemplo, o plano inclinado de Galileu. Fugimos então desse tipo de caracterização e optamos por caracterizar um experimento histórico como sendo aquele que tenha proporcionado um marco capaz de romper obstáculos à "ciência normal", no sentido de Thomas Kuhn (Kuhn, 2003), daquele tempo.

A história da ciência explicita vários instantes onde se podem encontrar esses experimentos históricos e nessa reconstituição percebemos que temporalmente se situam próximos aos pontos de ruptura que são abordados na obra de Bachelard. Em (Pleitz, 1999, p.256) temos alguns indícios de métodos e problemas envolvidos na identificação de uma experiência histórica, nesse trabalho ele nos dá algumas orientações no intuito de identificar elementos que tornam um experimento crucial. Segundo ele, ao procurarmos identificar na

[4] Veja no apêndice-B uma relação com diversos experimentos históricos da Física.

história da ciência experimentos considerados cruciais, poderemos encontrar exemplos nos quais:

- ✓ Uma experiência foi realizada antes que o seu conteúdo teórico estivesse desenvolvido e, por isso, não foi reconhecida como crucial na época.
- ✓ Experiências nas quais os preconceitos teóricos adiaram a sua validade.
- ✓ Experiências corretas que foram interpretadas em contextos teóricos errados.
- ✓ Experiências que não foram guiadas nem teórica nem epistemologicamente.

Esses parâmetros, no entanto não são suficientes para uma delimitação clara do que é um experimento crucial, entretanto percebemos que elas têm em comum o fato de se relacionarem de alguma forma com o contexto histórico do período. Segundo o próprio Pleitz:

> Ainda que aceitemos que a física é, em última instância uma ciência experimental, a relação teoria-experimento está longe de ser trivial. Qualquer experiência é sempre interpretada num determinado contexto teórico e, pela sua vez, uma experiência pode lançar novos desafios teóricos. Assim não podemos dizer sem ambigüidade quando uma experiência é crucial. (Pleitz, 1999, p.225).

A tabela a seguir mostra alguns experimentos que foram cruciais no eletromagnetismo.

Tabela 3.1 – Experiências Cruciais para o Eletromagnetismo (Halliday, 1994,p.299)

1.	Cargas de mesmo sinal repelem-se e cargas e sinais contrários atraem-se, com uma força que varia com o inverso do quadrado da distância que as separa.
2.	Toda carga colocada num condutor isolado desloca-se totalmente para a sua superfície.
3.	Não foi possível, até agora, verificar a existência de monopolos magnéticos.
4.	Uma barra imantada, ao atravessar uma bobina fechada, produz uma corrente nesta bobina.
5.	Ao variar-se a corrente numa bobina, verifica-se o aparecimento de uma corrente numa segunda bobina situada nas vizinhanças da primeira.
6.	Uma corrente num fio desvia a agulha de uma bússola.
7.	Dois fios paralelos que transportam correntes de mesmo sentido atraem-se.
8.	A velocidade da luz pode ser determinada por meio de medidas puramente elétricas e magnéticas.

3.3 – Aspectos que envolvem a reconstituição de um experimento histórico

Um elemento que, sem dúvida, é um complicador e que pode desencorajar o educador e o pesquisador na tarefa de reconstituição de um experimento histórico é, com certeza, concernente ao grau de dificuldade que possa envolver a sua construção física, entretanto esse "complicador" na realidade é bem menor do que se pode imaginar e isso se deve essencialmente por dois motivos: em primeiro lugar, há razoável consenso quanto à eficiência da utilização de aparatos de simples construção no Ensino de Ciências. A respeito da simplicidade experimental, Neves nos diz:

> Um dispositivo experimental para o estudo de fenômenos fundamentais da natureza deve ser simples, ainda mais quando o nosso objetivo é a Educação em Ciências, porque dessa forma recuperamos a beleza e simplicidade do fenômeno estudado. São simples: o pêndulo, a bússola, o espelho, a lente de aumento da lupa, o transistor, as engrenagens, as alavancas, etc. São simples também os brinquedos tradicionais da infância, os quais, formando parte importante de seu imaginário e apoiando-se sempre em princípios básicos da Física, transitam há séculos no cotidiano das crianças; piões, bolas, pipas, papagaios e pandorgas, bicicletas, bolinhas de gude, etc. (Neves, 2005, p.20).

Para o autor, esses tipos de dispositivos tão comuns encerram a possibilidade de se tratar conceitos de elevada importância para a ciência. Ele lembra ainda que, embora não seja um princípio, a comprovação histórica mostra que uma teoria, uma explicação, só se torna válida quando pode ser expressa em uma formulação simples e elegante. Em segundo lugar, e indo ao encontro das idéias de Neves, uma grande parte dos chamados experimentos históricos parece ter na simplicidade uma de suas características (Neves, 2005,p.20).

> Os instrumentos de física podem ser simples. Em 1896, Henri Becquerel descobriu as estranhas propriedades radioativas do urânio, e iniciou o ramo chamado: Física Nuclear, sem outro equipamento além de uma chapa fotográfica envolvida em papel preto, e alguns cristais de um químico especial. (PSSC, 1963,p.19).

Em recente artigo da revista britânica *Physics World*, Robert P. Crease fez um interessante levantamento: ao pedir para que físicos elegessem o experimento mais belo de todos os tempos, teve como resposta uma lista que deixava de lado complexos experimentos realizados pelos modernos centros de pesquisa, custando milhões de dólares e cujos resultados são processados por meses em supercomputadores. Ao contrário disso, obteve uma lista que privilegiava realizações solitárias, que em sua grande maioria poderiam ser feitas sobre uma mesa usando um poder computacional não maior que o de uma régua de cálculo[5] ou de uma calculadora (Crease, 2002). Nesse caso, simplicidade e beleza parecem andar juntas quando se fala em experimentos históricos. A tabela abaixo mostra os 10 melhores colocados dessa lista[6]:

Tabela 3.2 – Os mais belos experimentos da Física. (Crease, 2002)

Ano	Experimento
1961	1º- Da dupla fenda de **Young**, aplicado à interferência de elétrons
1638	2º- Queda de corpos realizada por **Galileu**
1851	3º- Da gota de óleo, realizado por **Millikan**
1672	4º- Decomposição da luz solar com um prisma, realizada por **Newton**
1803	5º- De interferência da luz, realizado por **Young**
1798	6º- Com a balança de torção, realizado por **Cavendish**
séc.III a.C.	7º- Medida da circunferência da Terra, realizada por **Eratóstenes**
1638	8º- Sobre o movimento de corpos num plano inclinado, realizados por **Galileu**
1911	9º- Espalhamento de **Rutherford**
1851	10º- Pêndulo de **Foucault**

Uma característica nítida que percebemos na lista dos mais votados é a união entre a simplicidade de construção e a sua participação no estabelecimento de novos paradigmas. Isso dá a esses experimentos enorme capacidade de serem trabalhados sob a ótica não apenas do

---

[5] A régua de cálculo é um instrumento capaz de realizar cálculos rapidamente. Funcionando com base nas propriedades da função logarítmica caiu em desuso com o surgimento das calculadoras de bolso.

[6] Uma relação mais completa se encontra incorporada aos dados do Apêndice-B.

fenômeno físico, mas também, valendo-se da própria epistemologia da ciência, no destaque de conceitos de continuidade e ruptura, elementos notoriamente ausentes dos conteúdos dos cursos de ciências. Vale ressaltar algumas características dessa lista: Galileu Galilei aparece com duas contribuições, embora a primeira se possa caracterizar como pseudociência, pois há controvérsias sobre a famosa experiência na Torre de Pisa (Matthews, 1995,p.174 e Koyré, 1982,p.197-207). A segunda, entretanto, é muito bem fundamentada e largamente estudada em sua última obra e que será explorada de forma mais detalhada no capítulo 4 do presente trabalho. O experimento mais antigo foi a medida da circunferência da terra por Eratóstenes e ocorreu no séc. III a.C. O mais recente foi eleito o mais belo, o experimento da dupla fenda de Young aplicada à interferência de elétrons, realizado em 1962 pelo alemão Claus Jönsson.

Com relação às fontes, deve-se procurar encontrar nas fontes, registros que descrevam a experiência em detalhes. A reconstituição de um experimento histórico invariavelmente suscita várias questões, das quais podemos destacar a necessidade de se possuir registros que descrevam a experiência com a maior fidedignidade possível. A pesquisa deve procurar se basear em fontes confiáveis ou mesmo em originais.

No nosso caso, a principal fonte de dados para a confecção do trabalho é a obra do próprio Galileu e de historiadores como Alexandre Koyré e Stillman Drake. Apesar de especialistas na obra de Galileu, possuem idéias profundamente contrárias de vários aspectos que iremos abordar. Nesse sentido o trabalho desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Ensino Superior e História da Ciência da Universidade de Oldenburg, Alemanha, vai ao encontro do que almejamos.

> A fim de reproduzir uma experiência histórica muitas informações devem ser colecionadas: Publicações originais, diários de laboratório ou cadernos, monografias e minutas de reuniões científicas. Estas fontes históricas dão informações sobre as instalações experimentais, a afinação dos diferentes componentes, os materiais, os procedimentos de ação que aconteceram

> durante a experiência, o quanto onde a experiência aconteceu (temperaturas de dimensões, exposição, etc). ou o tempo (do dia e do ano). Todas estas informações são úteis e necessárias para reconstruir a situação experimental tão exatamente quanto possível, a fim de reproduzir a experiência e trabalhar nisto. A necessidade de tais informações específicas e detalhadas não é óbvia no princípio do processo de pesquisa. Aparece durante o trabalho com uma réplica que informações são importantes ou não. Então, o processo de reproduzirem uma experiência histórica inclui o estudo de fontes textuais, planejando e construindo a réplica, experimentando com a réplica e reconectando as experiências com a experiência e o contexto histórico. (Hottecke, 2000,p.245).

Esse grupo de pesquisa da Alemanha defende a idéia de que a replicação de experimentos históricos pode ser de grande valia para o desenvolvimento de uma cultura científica, a partir do momento que se aprende reproduzindo, pois reconstruindo novamente situações experimentais históricas é possível descobrir dimensões do laboratório de ciências naturais. Nesse processo, não empregam o termo reprodução por entenderem ser essa tarefa impossível, mas sim o termo replicação. No trabalho de replicação contam com a participação de artesãos, procurando reconstituir o experimento com os mesmos materiais que foram usados no passado. Esse tipo de procedimento claramente requer orçamentos dilatados e auxílio de pesquisadores de história da ciência. Embora encontremos no panorama do ensino e pesquisa em ensino de física no Brasil um corpo significativo de profissionais capazes de conduzir tal processo a nossa proposta visa contemplar ainda os profissionais de ensino que não contem com esses recursos, por isso, ao contrário do grupo da Alemanha, primaremos por reconstituir o experimento da melhor forma possível, mas dentro de nossas limitações.

Nesse processo de resgate de experimentos históricos além da sua reconstrução física encontramos nas experiências de pensamento e nas simulações computacionais uma alternativa extremamente potente e rica no contexto do Ensino de Ciências e em particular no processo de reconstituição de um experimento histórico (fig. 3.1). A primeira por fazer parte da própria história da ciência e a segunda por se mostrar hoje uma ferramenta capaz de reconstituir processos de difícil ou mesmo impossível realização frente às limitações que encontramos no ambiente de ensino.

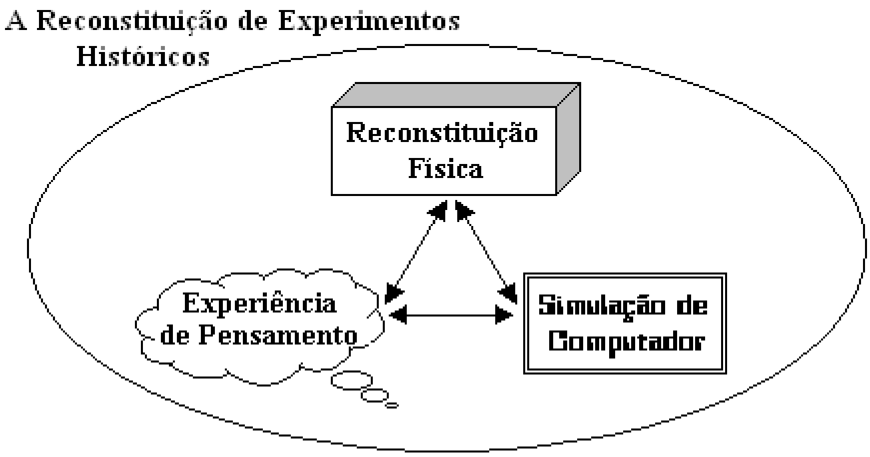


Figura 3.1 – Três possíveis dimensões da reconstituição de um experimento histórico

3.4 – *Gendankenexperiment:* As Experiências de Pensamento

Em nosso trabalho de resgate histórico do papel da experimentação como ferramenta do âmbito da ciência, além dos experimentos reais, identificamos uma classe de experimentos que se constituem não de materiais e substâncias, mas de idéias. As chamadas experiências de pensamento, também denominadas pelo termo alemão *Gedankenexperiment*[7] têm sido largamente usadas na Filosofia e na Física desde a Antigüidade. Podemos encontrar facilmente exemplos de seu emprego no largo período de tempo que separa a filosofia pré-socrática da física moderna. Na física o seu uso se tornou mais acentuado a partir dos trabalhos de Galileu. As chamadas experiências de pensamento ocupam um lugar importante na História da Ciência e são caracterizadas pelo esforço intelectual que o pesquisador tem que empreender. Esforço esse, que com bases lógicas e matemáticas é capaz de descrever um

[7] Termo normalmente creditado à Ernest Mach por sua obra de mesmo título publicada em 1887. A expressão, no entanto, foi popularizada com os *Gendankenexperiment* de Albert Einstein, utilizados para explorar algumas conseqüências da sua Teoria da Relatividade.

evento de difícil ou impossível realização frente às limitações naturais que o universo nos impõe. A sua amplitude de usos e aplicações na história da ciência é tão vasta que em um trabalho abordando essa categoria de experimento, Thomas Khun nos diz: "A categoria 'Experiência imaginária' é, de qualquer modo, demasiado ampla e demasiada vaga para se resumir" (Kuhn, 1977,p.294). Tentaremos então investigá-la verificando a sua capacidade de contribuição como ferramenta do pesquisador e do educador de ciências.

O seu emprego é presença marcante nos períodos de crise e da ciência normal por permitir, ainda segundo Kuhn, que o pesquisador tenha em foco, sobretudo a sua metodologia o que permite que funcione como um instrumento de meta-análise.

> Nem é acidental o fato de que em ambos os períodos a chamada experiência de pensamento ter desempenhado um papel tão crítico no progresso da pesquisa. Como mostrei em outros lugares, a experiência de pensamento analítica que é tão importante nos escritos de Galileu, Einstein, Bohr e outros é perfeitamente calculada para expor o antigo paradigma ao conhecimento existente, de tal forma que a raiz da crise seja isolada com uma clareza impossível de obter-se no laboratório. (Kuhn, 1977,p.120).

A ciência tem como foco de estudo não o mundo, mas um modelo desse mundo e esse modelo, às vezes, deve ser ajustado de forma que o seu estudo se torne mais fácil ou pelo menos possível. Essa flexibilidade que os modelos devem ter em relação ao mundo que os inspira pode tender para uma maior fidedignidade ou pelo contrário para uma simplificação que encontra nas experiências de pensamento um par perfeito. Planos absolutamente planos, superfícies esféricas absolutamente esféricas, linhas infinitas e o desprezo de forças de arrasto, são algumas das concessões admitidas pelas experiências de pensamento que permitem que se olhe o mundo com um olhar mais objetivo do que se teria, levando em consideração as inúmeras variáveis que na realidade existem. Nesse caso, as experiências de pensamento acabam funcionando como ferramenta de trabalho. Em relação às experiências de pensamento Kuhn diz:

> O historiador, pelo menos, deve reconhecê-las como ferramenta ocasionalmente potente para aumentar a compreensão humana da natureza. Não obstante, está longe de ser claro como é que elas podem alguma vez ter efeitos significativos. Muitas vezes, como no caso do Comboio de Einstein[8] atingido pelo raio nos dois extremos, elas tratam de situações que ainda não foram estudadas em laboratório. Algumas vezes, como no caso do microscópio Bohr-Heinseberg, estabeleceram situações que não se poderiam examinar-se completamente e que não ocorrem necessariamente na natureza. (Kuhn, 1977,p.293).

Nessa passagem Kunh ilustra o seu pensamento com uma experiência de pensamento muito comum nos livros de física, onde o autor ao apresentar o fenômeno da simultaneidade de eventos à luz da Teoria da Relatividade lança mão de uma situação imaginária na qual um comboio é atingido por raios nos dois extremos e onde a simultaneidade ou não dos eventos depende da velocidade de deslocamento do comboio em relação ao observador.

Alguns trabalhos apontam no sentido de usar a experiência de pensamento como ferramenta de Ensino de Ciências como, por exemplo, em (Lattery, 2001), onde a reconstituição de um experimento histórico sobre a Lei das Cordas de Galileu é feita. O autor ao fazer uma descrição de sua aplicação em um curso de ciência de nível secundário, procura também relacionar o fundo histórico e discutir aplicações educacionais. Nesse momento, são evidenciados aspectos que tornam esse recurso uma ferramenta importante no processo de ensino e pesquisa. Para tanto usa não apenas a pesquisa histórica, mas também recursos experimentais modernos, como por exemplo, sensores de posição conectados a um computador capaz de descrever o movimento com enorme precisão. Ao discorrer sobre uma fonte de problemas de pesquisa desafiadores para os alunos, Lattery diz: “Uma valiosa fonte de idéias podem ser achadas em experiências de pensamento famosas na história da física” (Lattery, 2001,p.485). Essa tese pode ser exemplificada com um fragmento da obra de

[8] O famoso experimento com o comboio apareceu pela primeira vez na vulgarização da teoria da relatividade de Einstein, note-se que esta experiência mental é apenas uma versão simplificada da que foi usada por Einstein na primeira comunicação sobre a teoria da relatividade. (Kuhn, 1977,p.293)

Galileu, que ao abordar a questão da ação gravitacional no *Diálogos* propõe a seguinte situação:

> Salviati: [...] Sendo assim, se o globo terrestre fosse atravessado por um buraco passando pelo seu centro, uma bala de canhão jogada através dele e movida por seu natural e intrínseco princípio seria levada ao centro, e todo esse movimento seria feito espontaneamente por um princípio intrínseco (de movimento) está certo? (Galileu, 2001,p.317).

Segundo Carneiro, o problema de estudar o movimento de um objeto dentro de um túnel que perfurasse toda a Terra, passando pelo seu centro, é hoje um dos problemas clássicos em mecânica[9], desdobrando-se em diversas variantes (Carneiro, 1989,p.106).

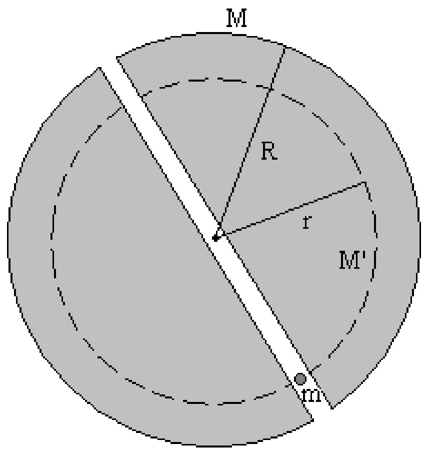


Figura 3.2 – Uma partícula que oscila de cima para baixo ao longo de um túnel que passa pelo centro da Terra. O tempo gasto entre as duas extremidades é de 42 min. (Halliday, 1992,p.50)

A figura 3.2, resgata esse problema como uma aplicação do "Teorema das Camadas" no que se refere ao comportamento gravitacional das camadas esféricas (Halliday, 1992,p.50). O quadro a seguir mostra algumas experiências de pensamento famosas que poderiam evoluir para estudos como o de Lattery. Das quais destacamos o experimento mental do "navio de Galileu", mais um dos inúmeros experimentos belos e simples, com os quais nos deparamos ao mergulhar em sua obra.

[9] No capítulo 5, veja: exp_h06.mdl

Tabela 3.3 – Alguns experimentos mentais famosos

Ano	Experimento imaginário
1638	Navio de **Galileu**[10] (Princípio da Relatividade Clássica)
1687	Balde de **Newton** (Discute que o espaço é absoluto e não relativo)
1871	Demônio de **Maxwell**[11] (Termodinâmica)
1905	Paradoxo dos Gêmeos, de **Einstein** (Teoria Especial da Relatividade)
1927	Problema do microscópio de raios gama, de **Heisenberg** (Mecânica Quântica)
1935	Paradoxo de **EPR** (Mecânica Quântica)
1937	Gato de **Schrödinger** (Mecânica Quântica)

O valor das experiências de pensamento é reconhecido também na obra de Alexandre Koyré. Sobre as experiências imaginárias, em um artigo que adverte sobre o seu abuso, ele nos diz:

> [...] desempenharam um papel muito importante na história do pensamento científico. Isso se compreende facilmente: as experiências reais são, freqüentemente, de difícil realização, pois implicam, não menos freqüentemente, a necessidade de uma complexa e custosa aparelhagem. Além disso, comportam, necessariamente, certo grau de imprecisão e, portanto de incerteza. Com efeito, é impossível produzir uma superfície plana que seja "verdadeiramente" plana, ou uma superfície esférica que seja "realmente" esférica. Não há e nem pode haver, **in rerum natura**, corpos perfeitamente rígidos; tampouco, corpos perfeitamente elásticos. Não se pode efetuar uma medida perfeitamente exata. A perfeição não pertence a este mundo. Certamente, pode-se aproximar dela, mas não se pode atingi-la. Entre o dado empírico e o objeto teórico existe, e sempre irá existir uma distância que é impossível vencer. (Koyré, 1982,p. 209, grifo do autor).

Apesar de ser uma ferramenta indispensável para os físicos, as experiências de pensamento estão sujeitas a erros. Para Reiner, esses erros podem ser cometidos tanto pelos físicos como pelos estudantes, no entanto defende a idéia que os físicos por terem um pensamento sistematizado sobre bases mais sólidas são menos propensos ao erro que os estudantes que ainda não têm desenvolvido a maturidade indispensável para fazer um julgamento mais adequado. Ele, no entanto, concorda com a idéia de que as visões atuais do saber consideram os conceitos prévios como uma fase necessária do desenvolvimento

[10] O fragmento que relata essa importante experiência de pensamento encontra-se no Apêndice-C.
[11] Abordagem sob a ótica da limitação da experiência de pensamento na física em (Reiner, 2003,p.375)

cognitivo do indivíduo, pois é justamente a ruptura com essas concepções primeiras que aproxima o indivíduo dos modelos cientificamente aceitos. Essas modificações podem ser ativadas por experiências, observação ou experiências de pensamento (Reiner, 2003).

Na esfera do ensino, Reiner ainda nos adverte do risco de que esses modelos jamais convirjam para os modelos cientificamente aceitos. Em sua investigação, procura não situações onde essas experiências imaginárias foram bem sucedidas, mas sim casos onde houve erro. Buscando assim, identificar os elementos que contribuíram decisivamente para isso, a fim de, é claro, procurar evitá-los.

3.4.1 – Um Exemplo de Experiência de Pensamento

Uma situação problema que existe ainda nos dias de hoje e que causa alguma confusão nos alunos é concernente à queda dos corpos. Segundo Franco Jr., a não concordância entre o senso comum e lei de queda dos corpos proposta por Galileu deriva do fato de que enquanto o senso comum refere-se ao observável, a lei galileana refere-se ao idealizado (Franco Jr., 1989,p.226). No mundo físico em que vivemos, onde forças dissipativas são tão comuns que tornam natural a idéia de que corpos pesados caiam com maior velocidade, aproximando-se assim da física aristotélica que por séculos perdurou. Sobre esse tema, Galileu nos brinda com um raciocínio cuja beleza e simplicidade caracterizam de forma exemplar o poder de uma experiência de pensamento. A passagem que apresentaremos a seguir, se encontra em seu último livro: “Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca das Duas Novas Ciências” (1938). Ao abordar os movimentos de queda ele afirma e prova que corpos de pesos diferentes caem com o mesmo tempo ao contrário do que afirma a física aristotélica. No fragmento a seguir, escrito na forma de discursos[12], um interlocutor (Salviati)

---

[12] O *Diálogo* (1632), tal qual os *Discursos* (1638), foram escritos em forma dialógica. Esta forma de apresentação foi muito utilizada no Renascimento. Para maiores detalhes sobre essa obra, veja o item 4.2.1.

tenta provar ao outro (Simpício) a inconsistência da idéia de que a velocidade de queda dependa do peso dos corpos:

> Salviati – Sem recorrer a outras experiências, podemos provar claramente, por uma demonstração breve e concludente, que não é verdade que um móvel mais pesado se move com maior velocidade que outro menos pesado, entendendo que ambos sejam da mesma matéria, como é o caso daqueles que fala Aristóteles. Porém, diga-me, Sr. Simplício, se admite que cada corpo pesado em queda livre corresponde a uma velocidade naturalmente determinada, de modo que não possa aumentá-la ou diminuí-la a não ser usando violência ou opondo-lhe alguma resistência.
>
> Simplício – Não se pode duvidar que o mesmo móvel no mesmo meio tem uma velocidade fixada e determinada pela natureza, que não pode ser aumentada a não ser acrescentando-lhe um novo ímpeto, nem diminuída, salvo por algum impedimento que o retarde.
>
> Salviati - Se tivéssemos, portanto, dois móveis, cujas velocidades naturais são desiguais, é evidente que, se uníssemos o mais lento com o mais rápido, este último seria parcialmente retardado e o mais lento aumentaria em parte sua velocidade devido ao mais veloz. Não concorda com minha opinião?
>
> Simplício – parece-me que assim é indubitavelmente.
>
> Salviati – Porém, se é assim e se é também verdade que uma grande pedra se move, por exemplo, com uma velocidade de oito graus, e uma menor com uma velocidade de quatro graus, então, unindo-as, o composto se moverá com uma velocidade menor que oito graus. Contudo, as duas pedras juntas formam uma pedra maior que aquela que se movia com oito graus de velocidade; do que se segue que esse composto (que também é maior que a primeira sozinha) se moverá mais lentamente que a primeira sozinha, que é menor; o que contradiz a sua suposição. Vemos, pois, como, supondo que o móvel mais pesado se move com maior velocidade que o menos pesado, concluo que o mais pesado se move com menor velocidade. (Galileu, 1988,p.61).

O esquema do raciocínio e a conclusão a que Salviati chega são representados pela figura 3.3. Nela, percebemos que partindo do princípio aristotélico de que a velocidade de queda dos corpos depende de seu peso (fig. 3.3a), poderíamos ligá-los por um fio de peso desprezível (fig. 3.3b), nesse caso a queda desse conjunto poderia ser vista de duas maneiras: A (fig. 3.3c) mostra a interação entre o corpo pesado e o leve, este tendendo a frear o movimento e aquele tendendo a imprimir maior velocidade, o raciocínio lógico indica que a velocidade resultante V_R deva ser com certeza inferior a V. Por outro lado, o conjunto P+p tem naturalmente um peso maior que P, e dessa forma V_R deverá se maior que V (fig. 3.3d).

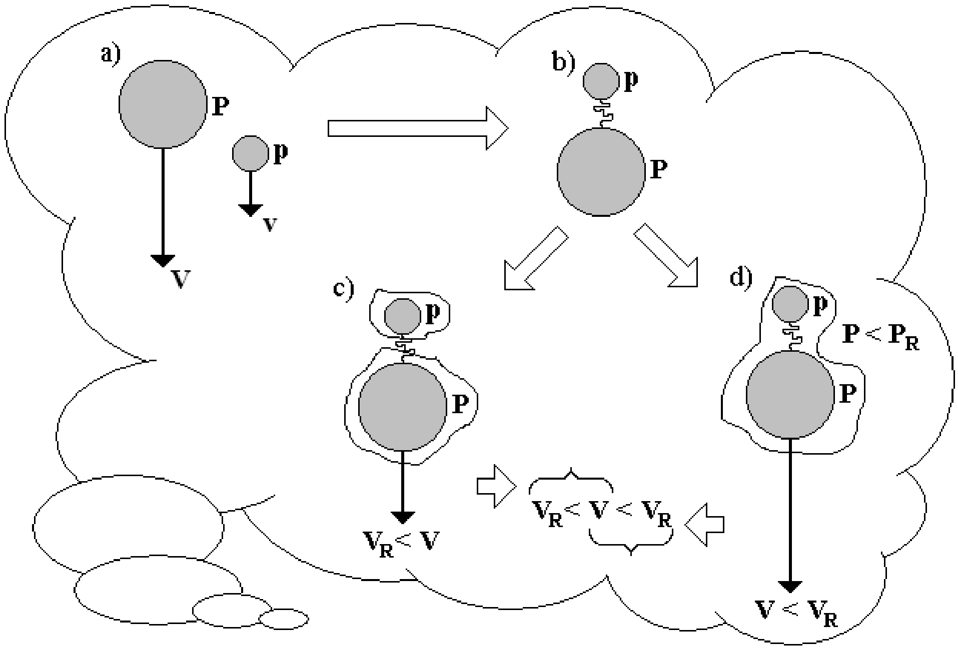


Figura 3.3 – Esquema inspirado na Experiência de Pensamento de Galileu que mostra a inconsistência da idéia de que a velocidade de queda seja proporcional ao peso do corpo.

A conclusão a que chegamos é que esse modelo é inconsistente, pois leva a resultados discordantes ao considerar que a velocidade dependa do peso. Esse exemplo mostra bem a força dessa ferramenta, pois, mesmo sem a utilização de qualquer instrumento que não o próprio raciocínio do leitor, consegue-se resolver o problema de forma clara. E que sem dúvida coloca o indivíduo frente a um obstáculo até então mascarado por um senso comum equivocado.

3.5 – O Emprego de Recursos Computacionais

Ao levantarmos situações experimentais que foram cruciais no desenvolvimento da ciência percebemos que muitas delas são de difícil realização ou mesmo impossíveis de serem realizadas com os limitados recursos que normalmente estão ao dispor de um profissional de ensino. Nesse caso, além do experimento real e das experiências de pensamento, a simulação computacional também pode ser um recurso a ser utilizado. Com o uso de simulação torna-se possível realizar experimentos que só seriam possíveis em laboratórios muito bem equipados (Yamamoto, 2001,p.215; Medeiros, 2002,p.79), além de que a utilização desses mundos virtuais pode ajudar a esclarecer aspectos, às vezes, muito sutis de um sistema físico.

> As simulações podem ser vistas como representações ou modelagens de objetos específicos reais ou imaginados, de sistemas ou fenômenos. Elas podem ser bastante úteis, particularmente quando a experiência original for impossível de ser reproduzida pelos estudantes. Exemplos de tais situações podem ser uma descida na Lua, uma situação de emergência em uma usina nuclear ou mesmo um evento históricos ou astronômicos. (Medeiros, 2002,p.78).

Mesmo nas situações em que há a possibilidade de realização do experimento real algumas dificuldades práticas como riscos à saúde; preços elevados; demanda de pessoal especializado ou mesmo problemas ligados à estrutura física dos laboratórios como espaço e falta de material, podem ser contornadas com o emprego da simulação:

> Nas aulas de teoria, em que a quantidade de alunos é maior do que no laboratório, as intervenções ilustrativas com o emprego de simulações são realizadas pelo próprio professor, com o uso de computador conjugado com projetor de multimídia. Pode-se com estas demonstrações, repetir várias vezes o experimento, com modificação de vários parâmetros, buscando auxiliar o aluno na visualização dos movimentos discutidos. (Yamamoto, 2001, p.218).

Segundo Hodson, as simulações em computador têm a vantagem de permitir que o professor adapte a experiência didática exatamente aos objetivos de aprendizagem em vez de ter de ajustar os objetivos de aprendizagem às complexidades da realidade. Embora uma atividade experimental concreta seja um evento de enorme riqueza para o aprendiz pelo fato de envolver não apenas os princípios fundamentais a que se refere o experimento, mas também os aspectos correlatos à sua realização. Entretanto esse tipo de preocupação, embora positiva sob o ponto de vista da operacionalização do experimento, pode servir de distração para o aprendiz em relação aos aspectos teóricos mais importantes do problema. Nesse caso, as simulações de computador poder diminuir o que Hodson denomina de "ruídos ao trabalho pedagógico" (Hodson, 1988).

> Pode-se diminuir ou aumentar o nível de complexidade, incluir ou excluir certas características, adotar "condições idealizadas", e geralmente criar uma situação experimental que permita que os aprendizes se concentrem nos conceitos centrais, sem distrações, irregularidades dos materiais e "ruídos ao trabalho pedagógico" tão característico dos experimentos com objetos reais. (Hodson, 1988, p.63).

Entretanto, a simulação tem limitações que devem ser consideradas quando do seu emprego. É primordial notar que um sistema real é normalmente muito mais elaborado que as simulações que o descrevem, daí a necessidade de diferenciar claramente o universo real do virtual.

> Existe uma diferença significativa entre o ato de experienciar-se um fenômeno através de um experimento real e de uma simulação computacional. Se tal diferença não for percebida, as simulações podem, por vezes comunicar concepções de fenômenos opostos àquelas que o educador pretendia veicular como seu uso (Medeiros, 2002,p.80).

A utilização do computador deve se fazer presente, não como as "máquinas de ensinar" preconizadas por Skinner, mas como ferramentas capazes de esmiuçar os fenômenos de forma a aumentar a percepção física dos alunos. Nesse sentido, as aplicações mais recorrentes do computador no ensino de física têm sido, em laboratório, como ferramenta de aquisição de dados em tempo real e na simulação de experiências (Yamamoto, 2001,p.216). Hoje em dia, existem inúmeros *softwares* capazes de realizar simulações de eventos físicos. Cada um tem as suas peculiaridades em relação a itens como: dificuldade de programação; interatividade; facilidade de operação; recursos gráficos e analíticos; preços e etc.

Em nosso trabalho de reconstituição, alguns experimentos serão feitos também via simulação computacional a fim de evidenciar algumas características físicas que envolvem alguns experimentos históricos. Para tanto, a modelagem no sentido de um processo de representação será empregada. Para Veit, um modelo é uma representação simplificada mantendo suas características essenciais (Veit, 2002,p.88) que pode ter um largo emprego no ensino de ciências por ser a própria ciência uma representação do mundo. Nesse processo, utilizando o conceito de modelagem exploratória[13] (Camiletti, 2002,p.111), empregaremos o aplicativo *Modellus*[14]. Esse aplicativo foi desenvolvido pelo professor Vitor Duarte Teodoro da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal e caracteriza-se por permitir a construção e simulação de fenômenos físicos a partir de equações diferenciais ou de funções que os representem e tem como vantagem não necessitar, para isso, de uma linguagem especial de programação (Veit, 2002,p.90).

Além disso, a escolha recaiu sobre esse aplicativo por satisfazer os seguintes critérios: ser um software de fácil aquisição na Internet; ter alta interatividade com o aluno; possuir a capacidade de simular os experimentos propostos nesse trabalho. Ainda segundo Veit "a modelagem facilita a construção de relações e significados, favorecendo a aprendizagem construtivista" (Veit, 2002,p.88). A enorme interatividade com o usuário também é outro ponto positivo que vai ao encontro dos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCN). "Se há uma unanimidade, pelo menos no plano dos conceitos entre educadores de ciências e a matemática, é quanto á necessidade de se adotarem métodos de aprendizagem ativo e interativo" (Brasil, 2002, p.266).

Dada a vasta literatura que existe sobre o aplicativo em questão nos limitaremos a empregar os seus recursos de forma a simular essencialmente dois experimentos históricos[15] e de alguns aspectos físicos a eles ligados. Esses dois experimentos são o plano inclinado de Galileu Galilei e o dispositivo empregado para explorar a sua Lei das Cordas.

---

[13] Modelagem exploratória é aquela onde o aluno é levado a explorar, no ambiente computacional, um modelo desenvolvido por um especialista.
[14] O aplicativo *Modellus* foi concebido e desenvolvido sob a coordenação de Vítor Duarte Teodoro da Universidade Nova de Lisboa em Portugal. Maiores informações sob o ambiente *Modellus* podem ser obtidas no site: http://phoenix.sce.fte.unl.pt/modellus/.
[15] Todas as simulações citadas são arquivos de extensão: "mdl" e encontram-se no CD-ROM em anexo a esta dissertação.

CAPÍTULO 4 – DOIS EXEMPLOS EXTRAÍDOS DA OBRA DE GALILEU

A natureza é escrita com caracteres matemáticos
-Galileu Galilei -

4.1 – Galileu e experimentação

A escolha por Galileu Galilei não foi aleatória, além de representar um marco para a Física ao se ligar de forma muito estreita com a experimentação, é figura central de um dos tópicos abordados no curso de Física do Ensino Médio, a cinemática[16] (Zanetic, 1988,p.17). Klubi, ao estudar outros métodos de intervenção didática em ensino de ciências, emprega o uso de textos originais e a reconstrução de experimentos históricos em sala de aula. Para tanto se concentra na vida e trabalho de Galileu Galilei (Klubi, 1999), onde segundo ele:

> Galileu não era somente um dos maiores autores científicos em história, ele estava lidando com assuntos que podem ser tratados em ciências na escola secundária. Suas contribuições para conceitos de movimento podem ser tratadas e entendidas por alunos de primeiro ano. E não vamos esquecer a habilidade de Galileu em inventar e descrever experiências, seu estilo eloqüente, a trajetória de sua vida pessoal e as disputas com a instituição mais poderosa de seu tempo estão bem no valor de discussão em classes de escolas secundárias. (Kubli, 1999,p.140).

Galileu ainda é classificado por Zanetic como um "cientista de veia literária", que seria um daqueles indivíduos que diretamente se relacionaram com a produção de conhecimento científico e que produziram obras científicas ou não que podem ser lidas como obras literárias, segundo o próprio autor, além de Galileu Galilei, outros como Isaac Newton,

[16] A cinemática é o ramo da física dedicado ao estudo do movimento, procurando analisá-lo, classificá-lo ou prevê-lo, estabelecendo suas leis sem, contudo, preocupar-se com suas causas (Moretto, 1987,p.80).

Charles Darwin, Ernest Mach, Albert Einstein, Niels Bohr entre outros também se enquadram nessa categoria (Zanetic, 1998). Para Zanetic:

> Galileu é a figura central de um tema da física, a cinemática ou o estudo do movimento sem atenção às suas causas, dos mais populares em nossas salas de aula do 2ºgrau e que ocupa grande número de páginas dos textos didáticos que abordam a mecânica. Foi ele que conseguiu romper de modo mais significativo a concepção de movimento local, que vinha desde o início do século IV a.C., na formulação original de Aristóteles, e que era o paradigma dominante enfrentado por ele, fiel seguidor e articulador das idéias copernicanas. Galileu introduziu na física, entre outras contribuições a explicação dos movimentos uniforme e acelerado, incluindo a queda dos corpos, e avançou na compreensão do princípio da inércia e da relatividade do movimento. Galileu também foi responsável pelas primeiras observações dos corpos celestes através de instrumentos óticos. Foi assim que ele notou os satélites de Júpiter, as irregularidades da Lua e as fases de Vênus, entre outras observações que reforçaram fortemente o paradigma copernicano. (Zanetic, 1998,p.17).

Encontramos ainda em (Matthews, 1995,p.189-190) um interessante relato ao descrever o seu trabalho de formação de professores. Ao aplicar um curso baseado na seleção de escritos de Galileu, Boyle, Newton, Huygens e Darwin, dentre outros, percebe que entre centenas de graduados em Biologia apenas alguns haviam lido algo sobre Darwin e, dentre outras centenas de graduados de Física, nenhum havia lido algo de Galileu ou Newton. Sendo esse um trabalho cujo público alvo é essencialmente formado de professores de Física ou de Ciências buscaremos explorar alguns aspectos da obra de Galileu de forma a tentar preencher essa lacuna e de, paralelamente, dar suporte ao nosso trabalho de reconstituição de experimentos históricos.

4.2 – A obra de Galileu

Ao analisarmos as características da obra de Galileu Galilei, encontramos elementos capazes de ilustrar satisfatoriamente as categorias de análise que apresentamos. Sua obra de fenomenal importância para o desenvolvimento da ciência, além de inaugurar um novo período na Física, é hoje, apresentada de uma forma que não corresponde à realidade dessa mesma ciência que buscamos ensinar. Uma prova disso encontramos no estudo de caso realizado por Teixeira, onde se chega à conclusão que a maioria dos professores possuem conceitos incorretos à respeito do papel de Galileu frente a Aristóteles e Newton (Teixeira, 1999). Esse quadro mostra bem um grau de despreparo que, em muito se distancia do mínimo que gostaríamos de ter, em pessoas que serão protagonistas nos processos de ensino que os alunos experimentarão.

Tabela 4.1 – Alguns dos principais livros de Galileu Galilei (Banfi, 1981, p.17-25)

Ano	Obra
1610	*Sidereus Nuncius* (O Mensageiro das Estrelas)
1621	*II Saggiatore* (O Experimentador)
1632	*Dialogo Sopra i due Massimi Sistemi del Mondo* (Diálogos Sobre os dois Máximos Sistemas de Mundo)
1638	*Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno à Due Nueve Scienze* (Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas Novas Ciências)

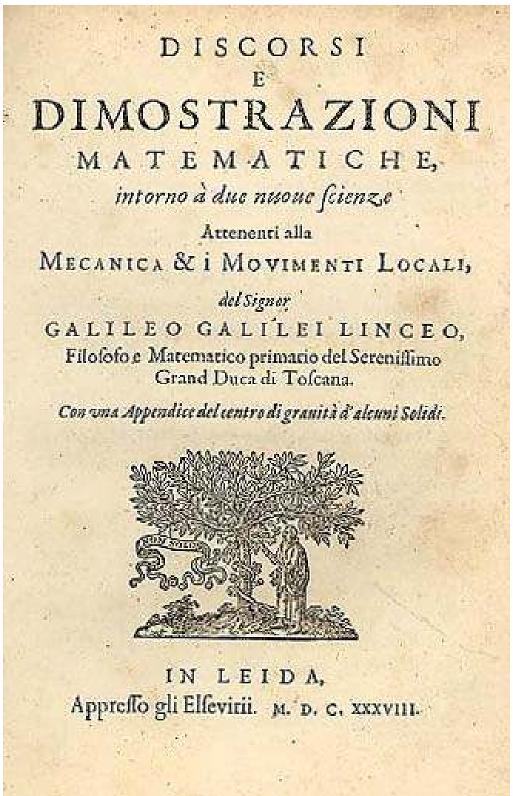
O nosso estudo de reconstituição de experimentos históricos encontrou importantes subsídios não apenas no trabalho de importantes historiadores e especialistas em Galileu, como Alexandre Koyré e Stillman Drake, mas também na obra do próprio Galileu, sobretudo no seu "Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas Novas Ciências", escrito em torno dos diálogos de três interlocutores: Salviati (Partidário das idéias de Copérnico e representando o próprio Galileu), Sagredo (Observador neutro que frente aos fortes argumentos de Salviati é obrigado a concordar com este) e Simplício (Defensor de Aristóteles, em alguns momentos parece representar a própria igreja que tanto questionou as idéias de Galileu). Com relação aos experimentos que a ele são atribuídos, existem dúvidas que serão levantadas por serem elas, parte constituinte da história da ciência, mas que acreditamos, não serem obstáculos para realização do nosso trabalho. Galileu viveu durante o

Renascimento, entre 1564 e 1642 em Florença, na Itália. Durante sua conturbada vida produziu extensa obra da qual a tabela 4.1 destaca suas maiores contribuições.

Os Discorsi foi a última obra publicada por Galileu. Representando um retorno aos seus estudos sobre o movimento, este livro será um dos pilares que utilizaremos a partir de agora como suporte no nosso trabalho de reconstituição de experimentos históricos.

4.2.1 – Discursos e Demonstrações Matemáticas Acerca de Duas Novas Ciências

Utilizando um recurso largamente usado no Renascimento, os *Discorsi* (1638) foram escritos na forma dialógica tal qual o *Diálogo* (1632) e com os mesmos três interlocutores: Salviati, Sagredo e Simplício. Recapitulando os resultados de suas primeiras experiências e acrescentando algumas reflexões, essa é a mais madura das suas obras. As duas novas ciências à que se refere o título da obra são a estática e a dinâmica.



DISCORSI
E
DIMOSTRAZIONI
MATEMATICHE,
intorno à due nuoue ſcienze
Attenenti alla
MECANICA & i MOVIMENTI LOCALI,
del Signor
GALILEO GALILEI LINCEO,
Filoſofo e Matematico primario del Sereniſſimo
Grand Duca di Toſcana.
Con una Appendice del centro di grauità d'alcuni Solidi.

IN LEIDA,
Appreſſo gli Elſevirii. M. D. C. XXXVIII.

Figura 4.1 – Frontispício da edição original de Discursos e Demonstrações Matemáticas acerca de Duas Novas Ciências, 1638. (Carneiro, 1989,p.07)

A obra é dividida em quatro jornadas, a primeira pode ser vista como uma introdução às duas novas ciências que serão abordadas nas outras três jornadas. A segunda se refere à problemas relacionados à estática, a primeira nova ciência a que refere o título. A terceira e quarta jornadas abordam a dinâmica que representa a segunda nova ciência. Ao longo dos *Discorsi* é possível encontrar inúmeros experimentos simples, sugeridos ou realizados por Galileu e que podem ser empregados em uma aula, ainda hoje (Carneiro, 1989,p.107).

Embora esse trabalho de resgate de experimentos históricos lance mão de toda a obra é na terceira jornada que concentraremos nossos esforços por tratar geometricamente das teorias do movimento uniforme e acelerado aplicadas aos movimentos de queda dos corpos. Os *Discorsi* não é apenas uma grande obra científica, ele mostra concretamente que Galileu era um filósofo no melhor sentido da palavra (Carneiro,1989,p.27).

Na tentativa de resgatar o plano inclinado de Galileu iremos nos ater detalhadamente aos aspectos relativos à esse problema que são elencados na terceira jornada dessa obra. Escrita na forma de discurso entre os três interlocutores já citados, e valendo-se largamente da geometrização dos movimentos ela requer em alguns momentos a compreensão de noções básicas da Geometria Euclidiana[17].

4.2.2 – A queda dos corpos

Historicamente, os conhecimentos desenvolvidos a seguir estão em conformidade com a epistemologia bachelardiana, pois surgem em resposta a uma pergunta que se relaciona intimamente à necessidade de se conhecer as leis que regem a queda dos corpos. Galileu ao responder essa pergunta lança mão de recursos como a geometria euclidiana, o estabelecimento de postulados, o emprego de experiências de pensamento e mesmo a

[17] Geometria baseada no texto do matemático grego Euclides, *Elementos*, escrito por voltada de 300 a.C. Seus conceitos são hoje trabalhados na escola no Ensino Fundamental. (Rezende, 2000,p.13).

realização de experimentos dos quais destacamos o emprego do plano inclinado. É nesse contexto que se insere esse instrumento tão simples, mas que se relaciona ao início de uma ruptura que foi o nascimento de uma nova física. Apresentamos então, segundo a seqüência disposta nos *Discorsi,* a análise do fenômeno da queda dos graves através do emprego do plano inclinado, frisando o papel do experimento como um elemento de estudo para a teoria que o gerou e não como ponto de partida para teoria (Silveira, 2006,p.37). Segundo Hodson, só se pode projetar experimentos para observar o que foi previsto (Hodson, 1988,p.57).

Após brevemente apresentar elementos do movimento uniforme, Galileu passa à essência dessa terceira jornada, o estudo do movimento naturalmente acelerado que tem como princípio básico a idéia de que os novos acréscimos de velocidade de um corpo devam ocorrer segundo uma proporção simples.

> Assim, qualquer que seja o número de partes iguais de tempo que tenha decorrido a partir do instante em que o móvel abandona o repouso e começa a descer, o grau de velocidade adquirido na primeira e segunda parte e o tempo será o dobro do grau de velocidade adquirido pelo móvel na primeira parte; assim também, o grau que se obtém em três partes de tempo será o triplo e, na quarta parte, será o quádruplo de grau obtido na primeira parte. (Galileu, 1988,p.160)

Nessa passagem, usando o tempo como parâmetro, Galileu dá a noção exata de proporcionalidade ao relacionar a velocidade ao tempo.

$$\begin{cases} t \rightarrow V \\ 2t \rightarrow 2V \\ 3t \rightarrow 3V \end{cases} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Sobre essa idéia se baseia toda a série de raciocínios que virão a seguir e que poderia ser expresso usando os recursos modernos de matemática como:

$$V \alpha\ t \qquad \textbf{(4.2)}$$

Essa idéia rompe com a física aristotélica que defende a tese de que a velocidade de queda de um corpo seja proporcional ao seu peso. Considerando "P" como sendo o peso do objeto e "R" a resistência do meio em que a queda ocorre, (Neves, 2005,p.146; Dias, 2004,p.259) a velocidade seria expressa modernamente como:

$$V \alpha \frac{P}{R} \quad \textbf{(4.3)}$$

A proporcionalidade do tempo em relação à velocidade proposta por Galileu em (4.2) é apresentada também geometricamente no esquema a seguir (fig. 4.2). Galileu atribui dimensões físicas de tempo, espaço e velocidade, capazes de descrever tanto um movimento uniforme como um movimento acelerado. O movimento uniforme é caracterizado pelo retângulo AF, onde percebemos que a velocidade (linhas horizontais inscritas no retângulo AF) não aumenta com o tempo. Por outro lado, o movimento acelerado é caracterizado pelo triangulo ABE, onde se percebe que a velocidade (linhas horizontais inscritas no triângulo ABE) aumenta de forma constante.

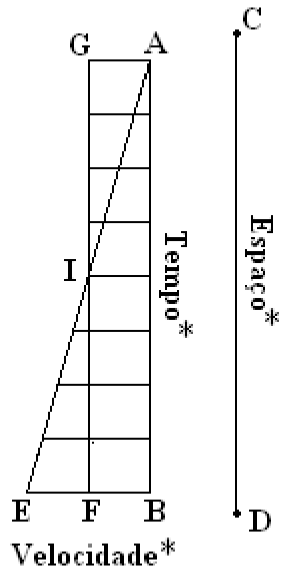


Figura 4.2 – Comparação entre o movimento uniforme e o movimento naturalmente acelerado (Galileu, 1988,p.170). * Nota minha!

Essa figura serve de suporte para o teorema I, Proposição I que relaciona o espaço e tempo dos movimentos uniforme e uniformemente acelerado ou ainda segundo Dias, Teorema da Velocidade Média (Dias, 2004).

> O tempo no qual um determinado espaço é percorrido por um móvel que parte do repouso com um movimento uniformemente acelerado é igual ao tempo no

> qual aquele mesmo espaço seria percorrido pelo mesmo móvel uniforme, cujo grau de velocidade seja metade do maior e último grau de velocidade alcançado no movimento uniformemente acelerado. (Galileu, 1988,p.170)

A figura 4.2, além de satisfazer geometricamente o teorema acima (correto sob o ponto de vista da Física Clássica), nos mostra alguns elementos importantes nesse processo do estudo do movimento de queda. O significado físico dos aspectos geométricos da figura, embora explicados no texto do livro, são colocados em evidência para facilitar a visualização.

4.2.3 – A geometrização do movimento e a Lei dos Números Ímpares

"O livro da natureza está escrito em caracteres matemáticos" (Galileu, 2001). Essa idéia de Galileu nos dá uma dimensão do quanto a geometria foi importante para a sua obra, chegando em alguns momentos a ser um empecilho para a compreensão plena dos movimentos de queda. A figura 4.3, retirada de seu *Discorsi* nos dá uma mostra de uma outra tentativa de representar o espaço, tempo e velocidade com recursos geométricos. Essa figura, entretanto, se mostra mais detalhada que a anterior (4.2) pela subdivisão do segmento HI em espaços iguais HL que representa o espaço percorrido pelo móvel em um movimento naturalmente acelerado durante um intervalo de tempo AD.

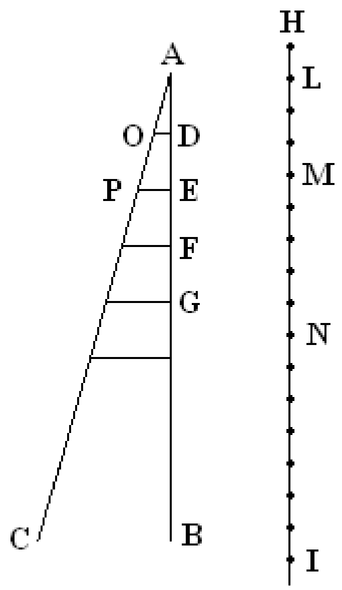


Figura 4.3 – Esquema geométrico do movimento uniformemente acelerado de queda de um corpo a partir do repouso (Galileu, 1988,p.171)

Esse raciocínio é apresentado de forma mais sintética pelo próprio Galileu em seu 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” (Galileu, 1988,p.171). Esse teorema acaba acarretando a chamada Lei dos Números Ímpares, que veremos agora em detalhes. Empregando recursos da matemática moderna esse teorema pode ser expresso por:

$$E \alpha \ t^2 \qquad \textbf{(4.4)}$$

Essa conclusão, que é correta em relação à física clássica, é fruto de observações de Galileu que o conduzem a geometrização do movimento na tentativa de compreendê-lo. Nesse processo uma de suas observações mais importantes, com relação à figura 4.3, é: “Afirmo que o espaço MH está para o espaço HL numa proporção dupla daquela que o tempo EA tem para o tempo AD” (Galileu, 1988,p.172). Como o tempo EA é o dobro de AD, o espaço MH deverá estar para o quádruplo de HL. A figura 4.4a, busca mostrar esse raciocínio com o auxílio das medidas na figura proposta por Galileu.

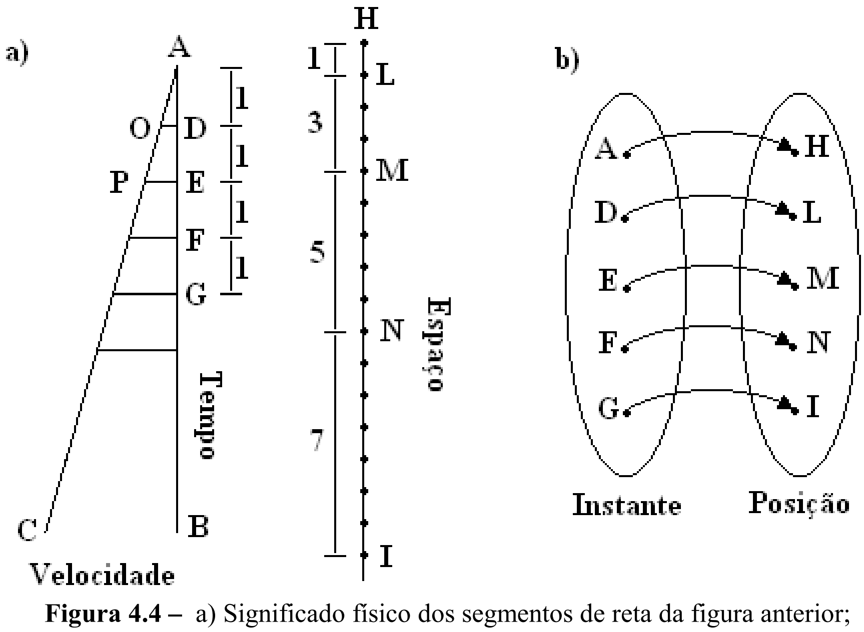


Figura 4.4 – a) Significado físico dos segmentos de reta da figura anterior; b) Relação biunívoca entre instante e posição.

Percebemos na figura 4.4b a descrição dinâmica de como o movimento se sucede. Os espaços percorridos pelo móvel aumentam na proporção indicada por Galileu como mostra a tabela a seguir:

Tabela 4.2 – Relação entre tempo & espaço da figura 4.4a

Tempo	**Espaço**
AD	HL
AE = 2.AD	HM = 4.HL
AG = 2.AE	HI = 4.HM

Na figura 4.4a, percebemos que, se a partir do primeiro instante fossem tomados intervalos de tempos iguais (AD, DE, EF, FG) nos quais se percorre respectivamente, os espaços (HL, LM, MN, NI), estes, estariam entre si como os números ímpares a partir de unidade: 1, 3, 5, 7, caracterizando então a Lei dos Números Ímpares. A tabela 4.3, a seguir, sintetiza essa idéia ao mesmo tempo em que vincula os espaços aos quadrados dos tempos como rege a equação (4.4).

Tabela 4.3 – Lei dos Números Ímpares Consecutivos (Neves, 2005, p.150)

Tempo de queda	**Espaço percorrido**
1	1
2	1 + 3 = 4
3	1 + 3 + 5 = 9
4	1 + 3 + 5 + 7 = 16
5	1 + 3 + 5 + 7 + 9 = 25

Com relação à esses espaços, Galileu conclui:

> [...] se tomarmos 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 dos tempos, a saber, como os quadrados dos tempos. (Galileu, 1988,p.174).

Isso reafirma a equação (4.4) na qual podemos substituir a relação de proporcionalidade por uma constante “k”.

$$E = k\,t^2 \tag{4.5}$$

Tomando k=a/2, onde “a” é a aceleração do móvel, teremos:

$$E = \frac{a\,t^2}{2} \tag{4.6}$$

Que é um caso particular da equação 4.7 quando $S_0=0$ e $v_0=0$. Essa função é denominada nos livros de Física do Ensino Médio como Função Horária da Posição (Moretto, 1987,p.120).

$$S = S_0 + v_0 t + \frac{a\,t^2}{2} \tag{4.7}$$

4.2.4 – O tempo como uma linha reta geométrica

Na mecânica de Galileu o tempo como dimensão do movimento evolui concomitantemente ao estudo do próprio movimento. Identificamos não apenas mais uma das inúmeras dificuldades que se impunham ao estudo da queda dos corpos, mas também sob a ótica da epistemologia de Bachelard em um obstáculo a ser superado. Salviati explica de forma clara o método de “pesagem do tempo” nas medidas envolvendo o plano inclinado.

> No que diz respeito à medida do tempo, empregávamos uma grande recipiente cheio água, suspenso no alto, o qual, por meio de um pequeno orifício feito no fundo, deixava cair um fino fio de água, que era recolhido num pequeno copo durante todo o tempo em que a bola descia pela canaleta ou por suas partes. As quantidades de água assim recolhidas eram a cada vez pesadas com uma balança muito precisa, sendo as diferenças e proporções entre os pesos correspondentes às diferenças e proporções entre os tempos; e isto com tal precisão que, como afirmei, estas operações, muitas vezes repetidas, nunca diferiam de maneira significativa[18]. (Galileu, 1988,p.176).

[18] Também essa importantíssima experiência do plano inclinado, como instrumento capaz de verificar as leis do movimento uniformemente acelerado, é praticada ainda hoje nas escolas. Nesta experiência se inspirou o pintor Bezzuoli para pintar uma luneta que se encontra na Tribuna de Galileu em Florença. A dificuldade experimental, insuperável com os recursos instrumentais daquele tempo, de verificar a queda livre sugeriu a Galileu o plano inclinado. No qual, com maravilhosa intuição e com sentido de proporcionalidade, ele pressupõe uma aceleração em proporção constante com a queda livre.

Embora esse método em teoria seja correto, o grande número de erros que se somam no processo comprometem enormemente os dados colhidos, logo, sob o ponto de vista da medida, a determinação tempo é um empecilho, pois os instrumentos ainda não estavam desenvolvidos suficientemente para dar-lhe dados suficientemente precisos para as conclusões que chegava de forma tão acertada. O que segundo alguns historiadores, seria um indício de que as experiências não foram de fato realizadas (Koyré, 1982,p.275), mas é consenso também além da enorme capacidade intelectual de Galileu o fato de ser um especialista em instrumentos de medida (prova disso é o seu "compasso militar" que corresponderia a uma régua de cálculo) além do que ele trabalhava com artesãos experientes. Isso torna possível a obtenção dos dados que nos são relatados (Thuiller, 1994,p.139). Entretanto, é fato que as dificuldades eram enormes: "[...] por exemplo, em oito batidas de pulso adquirido oito graus de velocidade, da qual tinha adquirido quatro graus na quarta pulsação, dois na segunda e um na primeira" (Galileu, 1988,p.161). Nessa passagem, Salviati ao relatar uma experiência de pensamento usa como base de medida as batidas do pulso, algo que sabemos ser extremamente variável.

A isocronia do pêndulo[19], conhecida por Galileu serve de suporte teórico para algumas de suas construções geométricas (Gallileu, 1988, p.168), mas não o auxilia na prática com as suas experiências. Será o físico holandês, Christian Huygens (1629-1695), o responsável pelos primeiros relógios de pêndulo que só surgirão ao descobrir o isocronismo do movimento cicloidal e ao encontrar um meio de fazer com que o balancim do pêndulo se mova ao longo dessa linha e não sobre a periferia do círculo (Koyré, 1982,p.287). Huygens também é o responsável pela primeira medida precisa da aceleração gravitacional, realizada em 1659, 17 anos após a morte de Galileu, achando um valor de $9{,}5 m/s^2$ para a constante

[19] Válida apenas para as pequenas oscilações, ao contrário do que acreditava Galileu.

"g[20]". Galileu, na prática, emprega como medida de tempo as chamadas clepsidras, relógios de água onde o tempo era estimado com base na quantidade de água que fluía com vazão constante.

Figura 4.5 – Clepsidra (UCS, 2005)

Entretanto, essas não pareciam ser as maiores dificuldades a se superar, segundo André Martins em um artigo que aborda a questão do tempo na mecânica galileana:

> Embora existissem à época relógios de Sol e de água, a sombra do "gnômon" ainda devia-se ao movimento do Sol no interior de uma esfera de éter ao redor da Terra, e a água das clepsidras ainda gotejava em direção ao seu (lugar natural). (Martins, 2002,p.159).

Segundo Martins, o problema não se tratava exatamente de medir o tempo, mas de usar a noção de tempo. Isso situa Galileu, sob a ótica da epistemologia de Bachelard em um ponto de ruptura entre o paradigma aristotélico-ptolomaico para o newtoniano. Essa influência se reflete claramente na sua obra ao buscar uma lei de queda dos corpos que relacionasse a velocidade à distância percorrida caracterizando o que (Martins, 2002, p.167) denominou "geometrizar em excesso" tentando atribuir ao espaço o que era válido para o tempo. Posteriormente, nos *Discorsi*, Galileu chega mesmo a reconhecer o engano. Ele abre caminho, através de seus teoremas e proposições para o conceito de tempo, mas infelizmente

---

[20] O valor médio para "g" na superfície da Terra é de $9{,}81 m/s^2$ (Halliday, 1991, apêndice C).

não deixa clara a sua representação de tempo que, seguramente, vai bem além do que a idéia expressa pela linha reta geométrica.

4.2.5 – As forças dissipativas – Obstáculos acidentais

Nos *Discorsi* a veia experimental de Galileu se mostra nítida nas suas inúmeras advertências quanto aos cuidados de se remover os chamados "obstáculos acidentais". A esse respeito e sobre os cuidados ao proceder uma experiência com um plano inclinado, Sagredo nos adverte:

> Na verdade parece-me que esta suposição é tão provável que merece sem controvérsia, entendendo sempre que se removam todos os **obstáculos acidentais** e externos e que os planos sejam suficientemente sólidos e lisos e o móvel tenha uma forma perfeitamente esférica, de modo que tanto o móvel como o plano não possua asperezas [...] (Galileu, 1988,p.167, grifo nosso).

Percebe-se que esses cuidados são um pré-requisito para suas experiências. Posteriormente ele exige, ao comparar o movimento de descida de um móvel em planos de diversas inclinações, desde que "[...] sejam removidos os obstáculos" (Galileu, 1988, p.180). Na quarta jornada, com relação às forças de arrasto que ocorrem no lançamento de projéteis, Galileu nos diz:

> Além disso, (e tomando um pouco mais de liberdade) posso demonstrar-lhes através de dois experimentos que a pequena dimensão dos instrumentos por nós utilizados faz com que sejam apenas observáveis as resistências externas e acidentais, entre as quais a do meio é a mais considerável. Farei considerações sobre os movimentos ocorrem no ar, visto que aqueles de que falamos são desse tipo; contra esses movimentos, o ar oferece sua força de duas maneiras; uma consiste em oferecer maior resistência aos móveis menos pesados que aos móveis muito pesados; ao outra consiste em oferecer maior resistência à maior velocidade que à menor velocidade de um mesmo móvel. (Galileu, 1988,p.253).

Além de deixar claro a proporcionalidade da resistência com a velocidade, ele também diferencia os movimentos de corpos diferentes onde o menos pesado sofreria, proporcionalmente, uma resistência maior que um mais pesado. Isso é válido se os corpos tiverem a mesma forma e forem confeccionados do mesmo material.

Um capítulo à parte no estudo da queda dos corpos se refere à suposta experiência realizada na Torre de Pisa. Onde duas esferas foram deixadas cair ao sabor da gravidade e chegando juntas ao solo, ter-se-ia comprovado, ao contrário do que prega a física aristotélica, a independência da massa com a velocidade e embora, numa situação ideal, essa idéia esteja correta, conforme discutimos no tópico 3.4.1, a experiência parece nunca ter sido feita (Koyré, 1982,p.197-207). Hoje, sabemos que, na prática, a queda simultânea de dois corpos diferentes só pode ocorrer se:

i. Se as forças, embora diferentes, ao atuarem sobre corpos também diferentes produzem uma mesma aceleração resultante;

ii. Na ausência de forças de resistência.

Independente da discussão acerca da realização ou não do experimento, observamos que Galileu ao usar corpos de mesma forma e de dimensões semelhantes parece ter garantido as condições do caso “i”. Seria omisso de nossa parte, nesse momento, não mencionar a enorme presença do segundo caso “ii” no ensino moderno de física. Sobretudo em mecânica, são inúmeras as citações em livros de ensino fundamental, médio e superior da seguinte frase: “[...] desconsiderando a resistência do ar [...]”, advertido explicitamente que a situação em questão será idealizada em relação às complexas forças aerodinâmicas que agem nos corpos que se movem imersos em um fluido.

A idéia de Galileu contraria o sentido comum e, na realidade, uma pena e uma bola não caem da mesma maneira. Largadas ao mesmo tempo, do topo de uma torre, a bola chega ao solo muito antes da pena. Toda a gente o sabe. O gênio de Galileu consiste, entre outras coisas, em ter percebido que isso se devia apenas à resistência do ar e que, eliminando todo o atrito, na queda realmente livre, a bola e a pena chegariam ao solo no mesmo instante.

> 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 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. (Galileu, 1988,p.69).

O experimento de queda no vazio teve que aguardar até o desenvolvimento de materiais e técnicas capazes de criar uma atmosfera suficientemente rarefeita para que a resistência do ar se tornasse desprezível o que só ocorreu com o emprego do chamado Tubo de Newton. A figura abaixo mostra a clássica experiência da pena e do martelo, onde, materiais, que embora extremamente diferentes (uma pena e uma esfera de chumbo), caem juntos dentro de um tubo que se fez vácuo (fig. 4.6b)

.

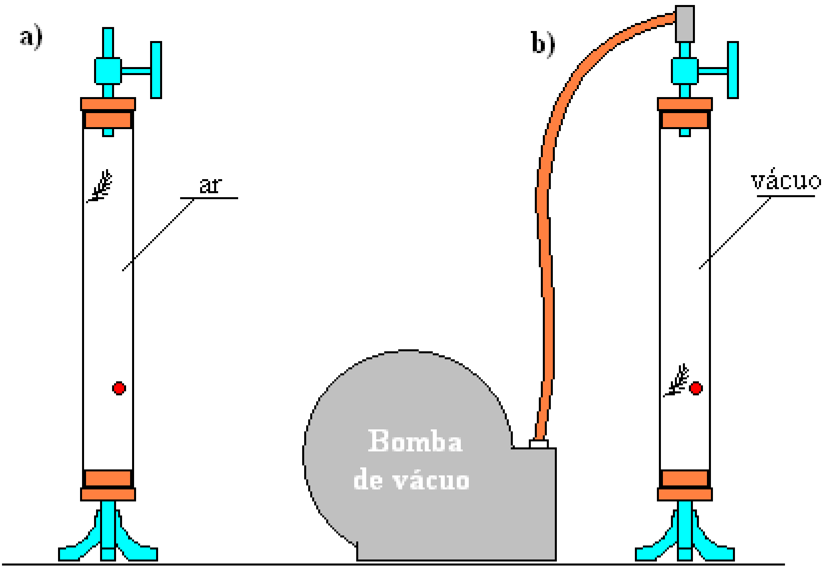


Figura 4.6 – Tubo de Newton: a) com ar; b) sem ar no seu interior

Posteriormente, e por razões de natureza didática, o mesmo experimento foi realizado na superfície da Lua, onde a ausência de atmosfera propicia o "vazio" (vácuo) a que Galileu se referia. Além disso, a Lua é um lugar privilegiado em relação à Terra, por ter uma aceleração gravitacional de apenas 1,6m/s^2, aproximadamente 1/6 da experimentada na superfície da Terra (Halliday, 1991, Apêndice-C). Em 02 de agosto de 1974, 336 anos após a publicação do *Discorsi* de Galileu, o comandante da *Apollo 15*, David R. Scott fez essa experiência sobre o solo lunar (figura 4.7). Foi um momento altamente simbólico. O filme da experiência foi exibido vezes sem conta a ponto de ser hoje considerado a experiência mais vista pelas pessoas (Crease, 2002). Scott largou ao mesmo tempo um martelo e uma pena de falcão e verificou que ambos chegaram simultaneamente ao solo. Nesse momento foi possível ouvi-lo: *"Mr. Galileu was correct in this findings!"* (Galileu estava certo em suas descobertas!).

Figura 4.7 – Astronauta David R. Scott em solo lunar. (NASA, 2006)

A experiência pode ser vista na Internet em (Nasa, 2006) e na simulação que se encontra em anexo[21], mas pode também ser reproduzida sobre a Terra, desde que se obtenha um vácuo suficientemente perfeito, o que era impossível nos tempos de Galileu.

4.3 – Plano inclinado

A queda dos corpos foi uma das áreas de estudo de Galileu que gerou e ainda gera opiniões contrárias (Hülsendeger, 2004). Apesar da coerência das experiências e de

---

[21] No capítulo 5, veja: exp_h7.mdl (*Feather Drop*).

pensamento propostas por ele e da suposta experiência realizada na torre de Pisa[22], na Itália, onde ele teria observando a queda de duas esferas de massas diferentes. As conclusões são de difícil comprovação, visto os curtos tempos e as altas velocidades que envolvem os movimentos de queda livre, mesmo hoje em pleno século XXI a questão da queda dos corpos ainda causa dúvidas entre os alunos, talvez em parte pela forma equivocada com que os livros didáticos, em geral, tratam o assunto (Franco Jr., 1989). O plano inclinado surge então, como um instrumento capaz de lhe fornecer importantes resultados sobre a análise desse tipo de movimento. Esse recurso é descrito principalmente na terceira jornada do *Discorsi* que trata do movimento local uniforme e acelerado.

> As experiências com a bola e o plano eram o tedioso mas triunfal prelúdio à verdade sobre a queda livre, que Galileu exprimiu em "Duas novas ciências" na forma de uma série de teoremas. Ele não usou a convenção da análise algébrica, que mais tarde permitiu que suas regras fossem reduzidas a algumas letras e símbolos, mas expressou seus achados a partir de proporções geométricas e redigiu suas comprovações numa densa prosa acompanhada por desenhos cheios de letras indicativas, no estilo dos antigos matemáticos gregos (Sobel, 2000,p.308-309).

Galileu emprega o plano inclinado baseado essencialmente em duas grandes idéias: em primeiro lugar, que os movimentos de queda ocorrem com o aumento de velocidade do móvel a taxas constantes em intervalos de tempos equivalentes, conforme abordamos nos tópicos 4.2.2 e 4.2.3. Em segundo lugar, por perceber relação de proporcionalidade entre um movimento vertical (muito rápido e de difícil estudo para os recursos a época) e um movimento ao longo de um plano inclinado (cuja dificuldade de estudo é inversamente proporcional à sua inclinação).

> 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; supusemos, com efeito, que em tais planos os graus de velocidade aumentam sempre na mesma proporção, ou seja, proporcionalmente ao tempo, ou ainda, segundo a simples série dos números inteiros. (Galileu, 1988,p.177).

[22] A realização dessa experiência é posta à prova em (Koyré, 1982,p.197-205).

Essas duas idéias consolidam o plano inclinado como um potente instrumento no estudo dos fenômenos de queda.

A figura 4.8, a seguir, ilustra os aspectos geométricos que caracterizam esse instrumento. O postulado expresso por Salviati, sintetiza uma das características do comportamento de uma esfera ao descer um plano inclinado, segundo ele "Os graus de velocidade alcançados por um mesmo móvel em planos diferentemente inclinados são iguais quando as alturas desses planos também são iguais" (Galileu,1988,p.167). A mesma figura, mostra três possíveis trajetórias para o corpo partindo de C, onde a velocidade de chegada em A, D ou B será a mesma independentemente do caminho percorrido. Essa idéia transmite uma noção de proporcionalidade que permite que a complexidade de um movimento de queda livre como o que ocorre em CB guarde relação com outros movimentos como CD ou CA que são mais facilmente mensuráveis[23].

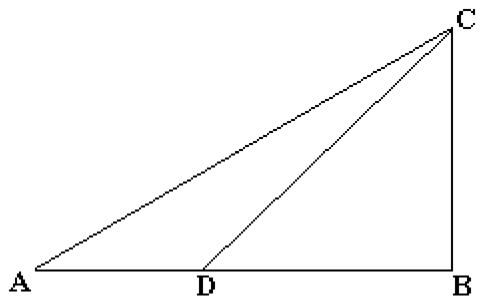


Figura 4.8 – Plano Inclinado (Galileu, 1988,p.167)

O plano inclinado representou uma ferramenta com um potencial de investigação enorme e que transcende em muito a simplicidade da sua construção, que segundo o próprio Galileu, não seria mais do que:

> Numa ripa ou, melhor dito, numa **viga de madeira** com um comprimento aproximado de 12 braças, uma largura de meia braça um lado a três dedos no outro, foi escavada uma canaleta perfeitamente retilínea, para ficar bem polida e bem limpa foi colocada uma folha de pergaminho que era polida até ficar bem lisa; fazíamos descer por ele uma **bola de bronze** duríssima

[23] Esse postulado é correto sob o ponto de vista do Princípio da Conservação da Energia. Entretanto a prova proposta por Galileu é feita através de uma analogia desse movimento com o movimento de um pêndulo. No capítulo 5, veja: exp_h4.mdl

> perfeitamente redonda e lisa. Uma vez construído o mencionado aparelho, ele era colocado em uma posição inclinada, elevando sobre o horizonte uma de suas extremidades até a altura de uma ou duas braças, e se deixava descer (como afirmei) a bola pela canaleta, notando como explorei mais adiante o tempo que empregava para descida completa; repetindo a mesma experiência muitas vezes para determinar a quantidade de tempo, na qual nunca se encontrava uma diferença nem mesmo da décima parte de uma batida de pulso (Galileu, 1988,p.175, grifo nosso).

Essa descrição mostra bem o grau de rusticidade do instrumento o que confirma a idéia defendida no tópico 3.3, de que a simplicidade é uma característica de muitos experimentos históricos. A figura 4.9, a seguir, mostra uma reconstituição artística desse instrumento pertencente ao Museu e Instituto de História da Ciência (IMSS), em Florença.

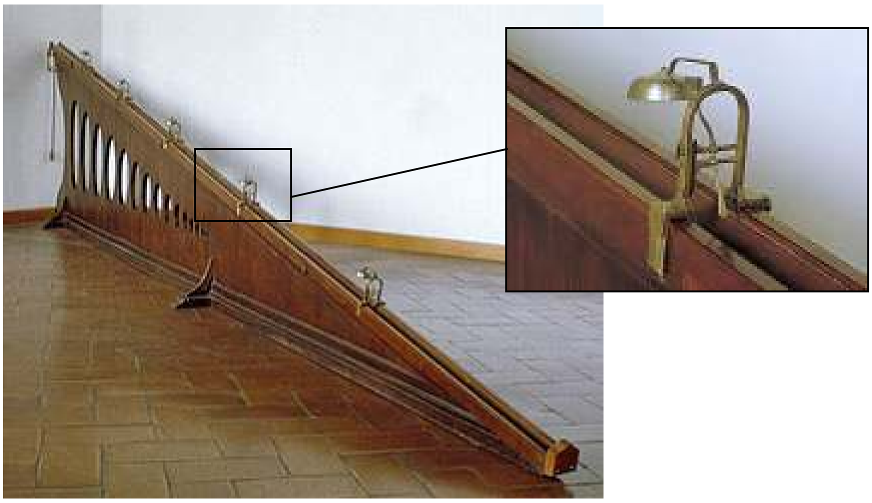


Figura 4.9 – Reconstituição do Plano Inclinado de Galileu (IMSS, 2005) e detalhe do sino no trilho (detector de passagem)

Essa reconstituição retrata o trabalho de um artesão extremamente competente no ofício de fabricar instrumentos. Nele percebemos dois elementos que, embora não sejam citados por Galileu, funcionam como eficiente ferramenta didática. Em destaque estão pequenos sinos ao longo do trilho com um espaçamento entre os mesmos que obedecem a "série dos números ímpares" (1, 3, 5, 7, 9...). Estes sinos são capazes de indicar com o seu ruído a passagem da esfera. Na mesma figura, e em segundo plano, percebemos a presença de um pêndulo capaz de oscilar com um período "T". Quando os sinos são espalhados ao longo do trilho de forma que "T/2" seja o tempo gasto para que o móvel percorra os diversos espaçamentos temos como efeito a nítida percepção de que embora o intervalo de tempo entre os ruídos dos sinos permaneça o mesmo, as distâncias aumentam com o tempo[24].

4.3.1 – O uso do plano inclinado

Além de perceber que os movimentos de queda tinham no plano inclinado um correspondente onde também a velocidade aumentava de forma proporcional ao tempo segundo a série dos números inteiros, Galileu explora algumas outras nuances específicas do plano inclinado. Nesse caso, uma vez, mais busca na geometria os caracteres que definem a natureza. Partindo do princípio, já demonstrado, que: "os espaços percorridos são proporcionais aos quadrados dos tempos e, conseqüentemente, aos graus de velocidade" (Galileu, 1988,p.179).

Um novo e importante elemento é acrescentado ao plano inclinado. Galileu inclui uma marca "D" sobre o trilho, onde o tempo gasto para que o móvel percorra o intervalo AD é o mesmo gasto na queda livre AC.

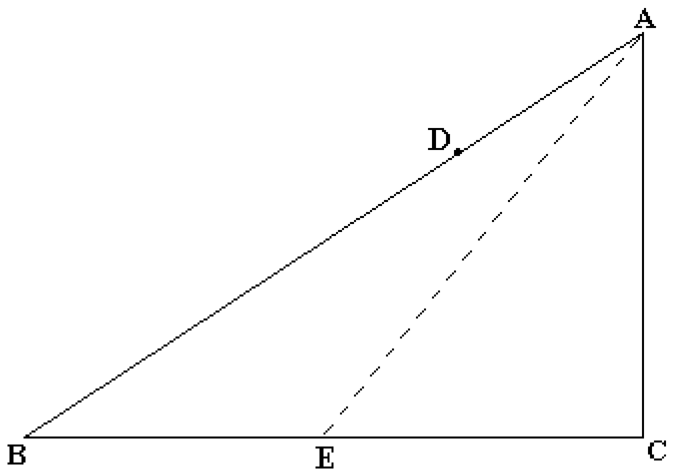


Figura 4.10 – Plano Inclinado (Galileu, 1988,p.181)

Sobre essa dinâmica Salviati nos diz:

> [...] o móvel no mesmo tempo em que percorrer o espaço vertical AC, percorrerá também o espaço AD no plano inclinado AB (sendo os momentos

[24] No capítulo 5, veja: exp_h08.mdl.

> como os espaços), e o grau de velocidade em C estará para o grau de velocidade em D na mesma proporção que existe entre AC e AD. (Galileu, 1988,p.181).

Apesar dessa explanação concordar com o princípio ao qual nos referimos anteriormente, a caracterização do ponto D se torna clara quando Salviati nos diz na mesma página da citação acima "tomemos no plano inclinado AB, AD como terceira proporcional[25] de AB e AC" (Galileu, 1988,p.181). Geometricamente o significado dessa relação é:

$$AD = \frac{AC^2}{AB} \qquad \textbf{(4.8)}$$

Ou ainda "AC, que é a média proporcional entre AB e AD" (Galileu, 1988,p.181). que de forma análoga ao caso anterior pode ser expressa por:

$$AC = \sqrt{AD \cdot AB} \qquad \textbf{(4.9)}$$

Nesse caso, conforme o apêndice D, no tópico sobre aplicações no triângulo retângulo podemos situar geometricamente o ponto D no plano inclinado AB da figura 4.10 de forma que o triângulo ACB seja semelhante ao triângulo ADC (figura 4.11).

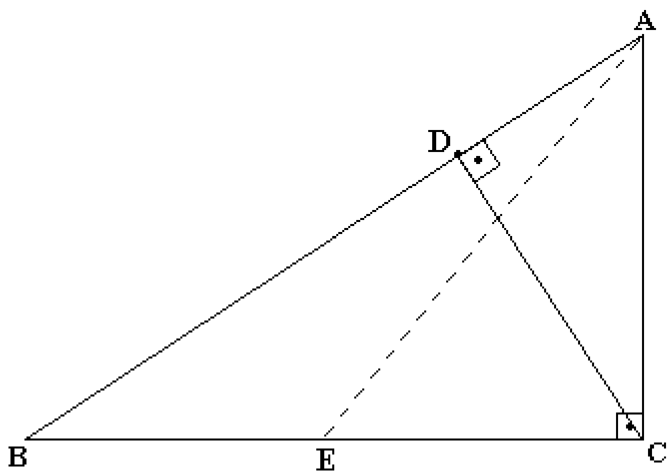


Figura 4.11 – Espaço percorrido pelo móvel no plano inclinado durante o tempo de queda da altura do plano.

Nesse caso, com o estabelecimento da posição de D em relação ao plano AB de forma tão clara, evidencia-se uma nova e importante dimensão do plano inclinado, pois o

[25] Terceira proporcional e média proporcional são elementos da proporção geométrica segundo a Geometria Euclidiana. O Apêndice-D apresenta esses elementos em detalhe.

movimento ao longo de AC ocorre com o mesmo tempo de AD, este de estudo é mais fácil, principalmente pela menor velocidade em relação à AC.

4.3.2 – Aspectos físicos envolvidos no movimento sobre o trilho

Os “obstáculos acidentais” ou forças dissipativas a que Galileu se refere nos *Discorsi* e que atuam no movimento de uma esfera ao descer por um plano inclinado são desconsiderados em situações ideais através de suas *Gendankenexperiment*. Entretanto, a compreensão da natureza dessas forças sob a ótica da física moderna pode nos mostrar algumas limitações do método empregado por Galileu e também explicar os novos dispositivos empregados para realizar o mesmo experimento.

A idéia de substituir um movimento de queda livre por um movimento de rolagem de uma esfera ao longo de um trilho tornou o seu estudo mais fácil na medida que diminuiu a aceleração, aumentando assim o tempo gasto para se percorrer a mesma distância que no movimento vertical. Entretanto, outras variáveis passaram a influir no sistema como: o movimento de rotação da esfera e a sua interação com o trilho além da força de resistência aerodinâmica do movimento de translação da esfera ao longo do trilho. Fisicamente, a forma mais simples de descrever o movimento de uma esfera sobre um trilho é considerando-a como um ponto material que deslize sem rolamento e onde as únicas forças envolvidas sejam a força peso (**P**) ou as suas componentes tangente ($\mathbf{P_X}$) e normal ($\mathbf{P_Y}$) ao plano inclinado e a força de reação ($\mathbf{F_N}$).

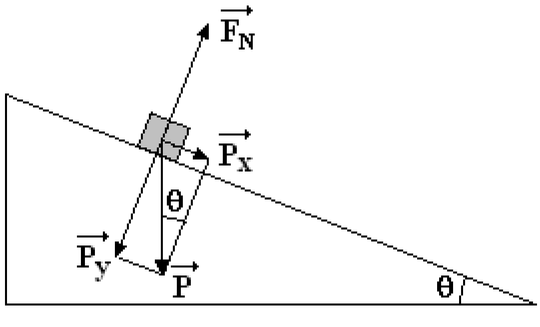


Figura 4.12 – Forças envolvidas na interação entre um corpo “cubo” e um plano inclinado “sem atrito”. (Moretto, 1987,p.219)

A figura 4.12, freqüentemente encontrada na maioria dos livros de 1º ano do Ensino Médio, ilustra o que foi dito. Como a força é proporcional à aceleração (equação 2.1) podemos substituir o peso (**P**) pela aceleração gravitacional (**g**) e a componente do peso ao longo do trilho ($\mathbf{P_x}$) pela aceleração (**a**) de descida ao longo do mesmo. Dessa forma teríamos:

$$a = g \cdot \operatorname{sen}\theta \qquad \textbf{(4.10)}$$

Onde a aceleração de descida depende apenas da aceleração gravitacional e do seno do ângulo de inclinação do trilho.

4.3.3 – O plano inclinado moderno

Apesar das inúmeras revoluções científicas que se processaram desde a Florença do séc XVII até os dias de hoje, o plano inclinado é ainda um objeto largamente empregado nos laboratórios de física no Ensino Fundamental, Médio e mesmo Superior. Nos cursos tradicionais o estudo do movimento de queda normalmente é abordado no tópico denominado Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV) dentro da Cinemática.

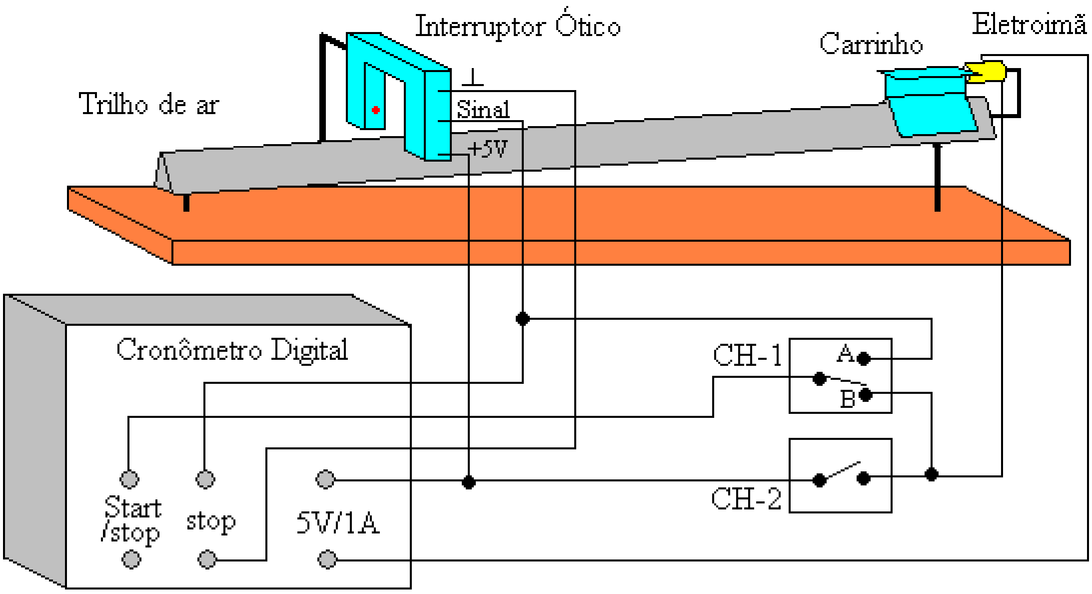


Figura 4.13 – Esquema do circuito elétrico da aquisição de dados de (S&t) ou (v&S) de um carro ao deslocar-se em um trilho de ar. (Cruz, 2006,p.62)

Embora o princípio de funcionamento do plano inclinado como ferramenta de estudo dos movimentos de queda permaneça o mesmo. Percebemos nos modelos modernos a preocupação de melhorar o seu funcionamento. Isso se consegue basicamente minimizando as forças dissipativas (obstáculos acidentais a que Galileu se refere inúmeras vezes) e aumentando a precisão nas coletas de dados de posição e tempo do móvel. A figura 4.13 mostra o esquema de montagem de um plano inclinado empregado na disciplina de Física 1 Experimental, da Universidade de Brasília.

Nesse caso, em relação ao plano inclinado que citamos na página 75, a ***bola de bronze*** é substituída por um carro de alumínio e a ***ripa de madeira*** por um trilho de aço inoxidável com centenas de pequeninos furos dos quais sairá um fluxo de ar impelido por uma bomba. Ao colocar o carro sobre esse trilho, o fluxo de ar gerará um colchão de ar capaz de erguer o carro, diminuindo enormemente ao atrito entre o carro e o trilho. O carro além de ter um coeficiente de arrasto aerodinâmico[26] menor que o da esfera tem a vantagem de concentrar toda a sua energia de cinética em seu movimento de translação ao longo do trilho ao contrário da esfera que transfere parte substancial de sua energia para o movimento de rotação em torno do seu centro de massa. Ao invés da ***"pesagem do tempo feita através da clepsidra",*** um sensor ótico de passagem ligado a um cronômetro digital é colocado ao longo do trilho em posição conhecida.

Esses cuidados garantem além de precisão na medida, uma interação mínima do sensor no movimento do carro. Dessa forma, os dados de posição & tempo (chave na posição B) ou velocidade & tempo (chave na posição A) possuem precisão suficiente não apenas para a verificação que se trata de um Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV), mas

[26] O coeficiente de arrasto aerodinâmico (C_x) é um coeficiente adimensional que depende da forma do objeto em movimento e cujo valor geralmente está entre 0,5 e 1. (Halliday, 1991, p.102)

também para determinar de forma gráfica ou estatística[27] os parâmetros da equação 4.7, como por exemplo, a aceleração “a” do móvel, e conseqüentemente a aceleração gravitacional “g” do local (equação 4.10) (Cruz, 2006,p.09-13).

As atividades envolvendo o uso de trilhos de ar não implicam apenas no emprego de caros aparelhos de laboratório, Laudares mostra que usando um tubo de PVC perfurado como trilho de ar; um cano como carrinho e chaves do tipo *“read-switch”*[28] como sensores pode-se conseguir dados de posição & tempo bastante precisos (Laudares, 2004,p.235). Prova isso, encontrando, com esse aparelho, o valor de $9{,}77\pm0{,}07 m/s^2$ para a aceleração gravitacional da cidade do Rio de Janeiro. Valor esse que em muito se aproxima do valor medido por meios mais precisos (Laudares, 2004,p.236).

4.3.4 – Algumas considerações acerca da energia mecânica do sistema esfera-trilho

Embora qualitativamente, o experimento cumpra bem o seu papel, pois todas as relações propostas por Galileu são satisfeitas, uma abordagem quantitativa também é possível se alguns cuidados forem tomados. Dentre as fontes de erro, duas se mostram mais significativas:

- ✓ O escorregamento sem rolamento nos ângulos acima de um determinado valor (função do coeficiente de atrito estático entre o trilho e a superfície da esfera);
- ✓ Transferência de parte substancial da energia cinética de translação do centro de massa da esfera para o movimento de rolagem da mesma.

No tópico anterior, discutimos algumas aplicações do plano inclinado moderno que utiliza carros sobre colchões de ar e sensores de posição acoplados à dispositivos de aquisição

---

[27] Usando uma técnica de regressão não linear para função de 2º grau (Freund, 1993,p.315) podemos conseguir uma melhor estimativa para a aceleração “a”.

[28] O “*read-switch*” é uma chave magnética capaz de funcionar como sensor de proximidade.

automática de dados. Uma dessas aplicações é a medida da aceleração gravitacional "g". Um experimento fiel à descrição de Galileu (Galileu, 1988,p.175) é capaz de nos dar dados qualitativos e quantitativos se alguma considerações forem feitas. Nesse caso, um estudo da dinâmica do movimento da esfera no trilho se faz necessário. Para tanto, consideraremos o conjunto Esfera & Trilho indeformável e sem escorregamento.

Sob o ponto de vista da cinemática, o corpo se moverá seguindo a relação (4.10). Entretanto se considerarmos a dinâmica de corpos rígidos a energia cinética da esfera "K", será a soma da energia de translação do seu centro de massa "K_T" e da sua energia de rotação em torno do seu centro de massa "K_R". Assim:

$$K = K_T + K_R \tag{4.11}$$

(Halliday, 1991, p.242) mostra que usando K_T=½Mv^2 e K_R=½$I_{cm}w^2$, teremos:

$$K = \frac{Mv_{CM}^2}{2} + \frac{I_{CM}w^2}{2} \tag{4.12}$$

Como no caso da esfera I_{CM}=(2/5)MR^2 e w=v/R, teremos:

$$K = \frac{Mv_{CM}^2}{2} + \frac{1}{2}\frac{2}{5}MR^2\left(\frac{v_{CM}}{R}\right)^2 = \frac{Mv_{CM}^2}{2} + \frac{Mv_{CM}^2}{5} = \frac{7}{10}Mv_{CM}^2 \tag{4.13}$$

Podemos estimar o percentual da energia de translação em relação à energia cinética total "f_T" calculando a razão entre ambas, ou seja: K_T/ K. Assim:

$$f_T = \frac{K_T}{K} = \frac{\frac{1}{2}Mv_{CM}^2}{\frac{7}{10}Mv_{CM}^2} = \frac{5}{7} = 0{,}71 = 71\% \tag{4.14}$$

O parâmetro "f_T" mostra que apenas 71% da energia cinética do sistema está relacionada à translação do centro de massa da esfera. A tabela a seguir apresenta um demonstrativo entre o movimento de alguns corpos rígidos clássicos.

Tabela 4.4 – Energia de corpos rígidos ao rolarem sem escorregamento sobre uma superfície com um único ponto de apoio (Halliday, 1991,p.242)

Objeto	**Momento de Inércia I_{CM}**	**Porcentagem de energia na Translação (f_T)**	**Porcentagem de energia na Rotação (f_R)**
Aro	$1MR^2$	50 %	50 %
Disco	$(1/2)MR^2$	67 %	33 %
Esfera	$(2/5)MR^2$	**71 %**	29 %

Embora teoricamente esse cálculo esteja correto, na prática ele necessita de ajustes uma vez que, normalmente, o plano inclinado pelo qual a esfera desce é na realidade um trilho que a toca em não um, mas em dois pontos. Nesse caso, é necessário considerar os valores do raio da esfera e a largura do canal, uma vez que a combinação de ambos pode afetar o resultado esperado para o experimento (Pimentel, 2005, p.210).

Para resolver esse problema empregamos o conceito de raio efetivo que é geometricamente a distância do centro da esfera até o plano imaginário que passa pelos pontos de contato com o trilho (Pimentel, 2005,p.210) A figura 4.14a, abaixo ilustra esse conceito.

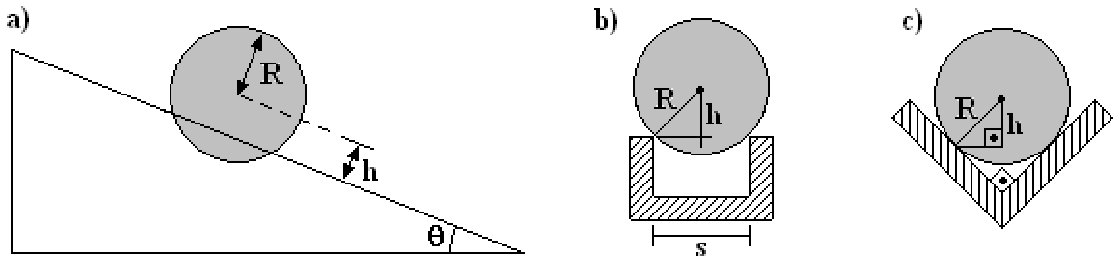


Figura 4.14 – a) Vista lateral de uma esfera de raio "R" e raio efetivo "h" em um plano inclinado de inclinação θ. Corte transversal da esfera em um trilho: b) em "U" de largura "s". c) em "V" com 90º de abertura.

A distância entre o centro de massa e o trilho é então o que denominamos raio efetivo "h". As figuras 4.14b e 4.14c são cortes transversais de dois tipos de trilhos normalmente empregados na confecção de planos inclinados. A trigonometria nos mostra que:

$$h = \sqrt{R^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad \text{(fig. 4.14b)} \tag{4.15}$$

$$h = \frac{R\sqrt{2}}{2} \quad \text{(fig. 4.14c)} \tag{4.16}$$

No caso de outras variações o raio efetivo pode ser determinado encontrando a menor distância do centro da esfera à linha que une os pontos de contato desta com o trilho.

Considerando o raio efetivo "h", a energia cinética da esfera ao longo do trilho ainda pode ser representada pela equação (4.12), entretanto, a velocidade angular da esfera nesse caso será w=v/h. Substituindo essa velocidade angular e o momento de inércia da esfera em (4.12) teremos:

$$K = \frac{Mv_{CM}^2}{2} + \frac{1}{2}\frac{2}{5}MR^2\left(\frac{v_{CM}}{h}\right)^2 = \frac{Mv_{CM}^2}{2} + \frac{Mv_{CM}^2}{5}\left(\frac{R}{h}\right)^2$$

$$K = Mv_{CM}^2\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{5}\left(\frac{R}{h}\right)^2\right) \tag{4.16}$$

Mais uma vez, estimaremos o percentual da energia de translação em relação à energia cinética total calculando a razão entre K_T e K. Assim:

$$f_T = \frac{K_T}{K} = \frac{\frac{1}{2}Mv_{CM}^2}{Mv_{CM}^2\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{5}\left(\frac{R}{h}\right)^2\right)} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{5}\left(\frac{R}{h}\right)^2}$$

$$f_T = \frac{1}{1 + \frac{2}{5}\left(\frac{R}{h}\right)^2} \tag{4.17}$$

Considerando "f_R" a fração correspondente à energia cinética de rolamento da esfera em torno do seu centro de massa, podemos dizer que:

$$f_R = 1 - f_T \qquad \textbf{(4.18)}$$

O gráfico abaixo representa "f_T" e "f_R" em função de "h" com base em (4.17) e (4.18).

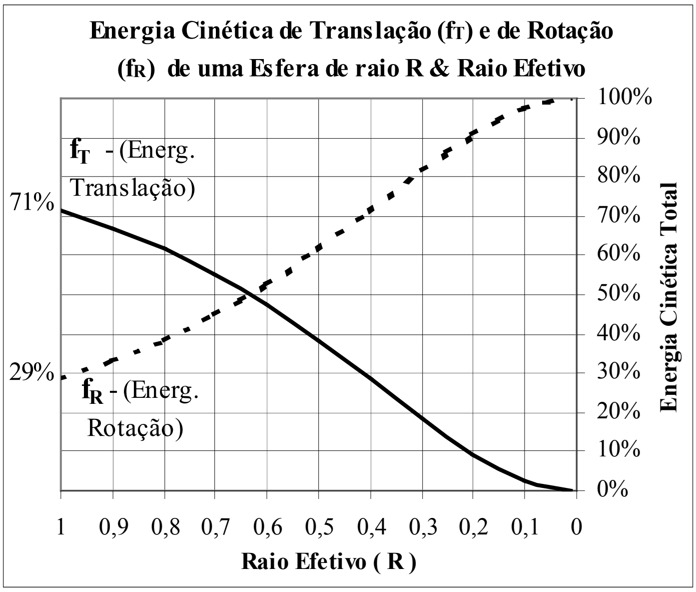


Figura 4.15 – Energia cinética de translação e de rotação de uma esfera de raio R & Raio efetivo

O gráfico deixa claro a dependência da energia de translação e naturalmente da aceleração linear do centro de massa da esfera em função do raio efetivo. Observe que para h=1R, teremos f_T=0.71, o que concorda com o (4.14). A consideração acerca das energias envolvidas influi também na descrição cinemática do movimento, onde a expressão (4.10) deve sofrer um ajuste correspondente à energia cinética de translação, assim:

$$a = f_T\left(g \cdot \text{sen}\theta\right) \qquad \textbf{(4.19)}$$

Embora tenhamos analisado o problema sob a ótica da conservação da energia mecânica no sistema, o resultado alcançado em (4.19) também pode ser encontrado usando as Leis de Newton (Arriassecq, 1999 e Silva, 2003). Importante lembrar que a conservação da energia de translação da esfera ocorre apenas enquanto não houver escorregamento, o que segundo (Silva, 2003,p.382) ocorreria quando:

$$\mu_E < \frac{2}{7}\text{tg}\theta_M \qquad \textbf{(4.20)}$$

Onde μ_E é o coeficiente de atrito estático entre o trilho e a esfera e θ_M o ângulo de inclinação máximo para que ocorra o rolamento sem escorregamento[29]. No caso dos dados desse autor o escorregamento começou a se manifestar em ângulos superiores a 32º.

O conhecimento desse tipo de comportamento é de grande valia principalmente em laboratórios com poucos recursos, pois uma das maiores dificuldades dos alunos reside justamente em obter medidas de tempo e posição confiáveis. Qualitativamente os valores conseguidos estarão de acordo com as previsões de Galileu independente da duração da queda (quanto maior o tempo de queda maior será a facilidade em coletar os dados). Embora o uso prioritário de um experimento não deva se resumir na simples comprovação da teoria, uma possibilidade que esse modelo abre é a da determinação da aceleração da gravidade.

Nesse tópico trabalhamos com o estudo da esfera como um corpo rígido em um movimento sem escorregamento, entretanto resultados também muito bons podem ser obtidos com o uso de volantes (Atx, 2004), pois estes possuem maiores momentos de inércia em relação à esfera e conseqüentemente têm menores valores de "f_T".

4.4 – Lei das Cordas

O segundo experimento que tentaremos resgatar não parece ter sido realizado pelo próprio Galileu, mas sim, posteriormente para provar um de seus teoremas: A Lei das Cordas. Como a corda de um círculo disposto na vertical pode representar um plano inclinado essa lei torna-se um caso particular nos seus estudos sobre a queda dos graves em planos inclinados.

---

[29] Equação válida para uma esfera de raio efetivo igual ao seu próprio raio.

No tópico (4.3.1) foi mostrado alguns elementos do método de estudo que Galileu empreendeu em torno do plano inclinado. Nesta ocasião, procurou-se situar geometricamente o espaço ao longo do trilho que seria percorrido pelo móvel durante o mesmo intervalo de tempo de uma queda livre da altura do plano. Galileu mostra que esse espaço é a terceira proporcional entre o comprimento e a altura do trilho (tópico 4.3.1). Galileu, entretanto, valendo-se continuamente de elementos da Geometria Euclidiana no estudo comparativo do tempo de descida do mesmo móvel ao longo de diferentes planos inclinados, explora outras situações, que foram resumidas nos teoremas a seguir:

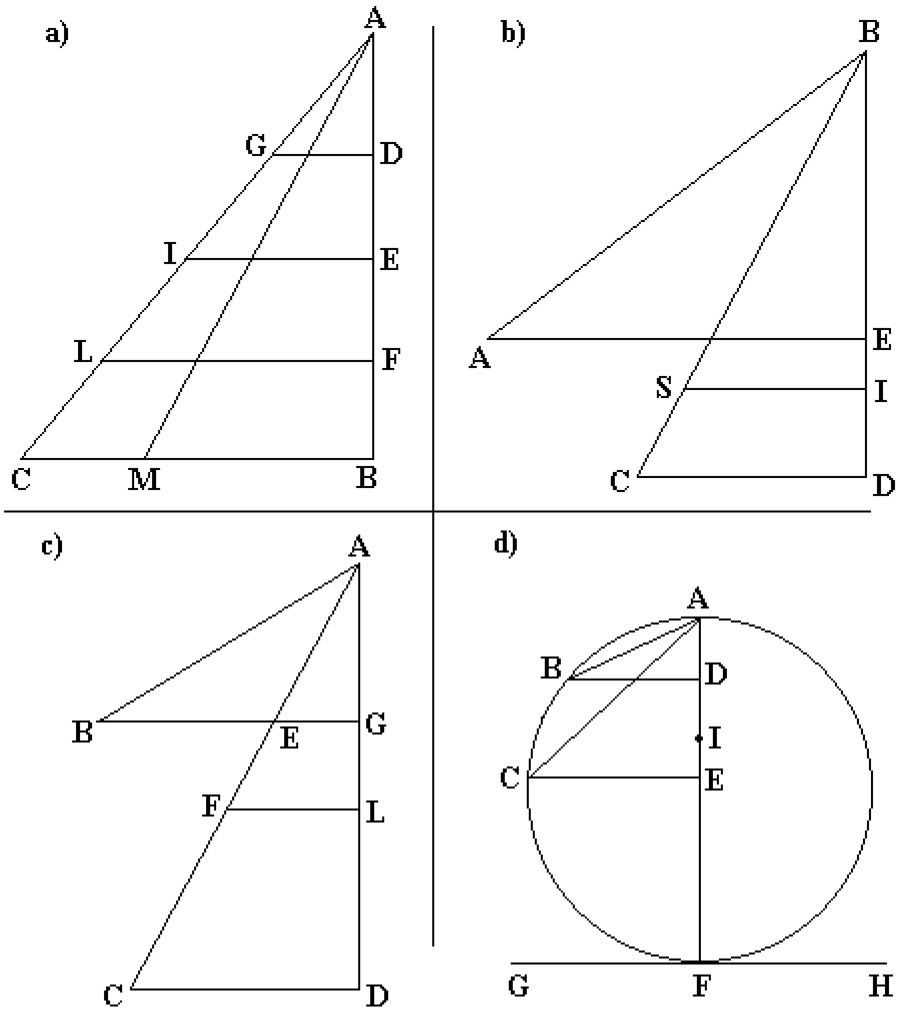


Figura 4.16 – Planos estudados por Galileu. a) Teorema III; b) Teorema IV; c) Teorema V; d) Teorema VI. (Galileu, 1988,p.182-186)

a) Teorema III - Sobre planos inclinados de mesma altura (fig.4.16-a)
b) Teorema IV - Sobre planos inclinados de mesmo comprimento, mas de alturas diferentes (fig.4.16-b)
c) Teorema V - Sobre planos inclinados de comprimento e alturas diferentes (fig.4.16-c)
d) Teorema VI - Sobre planos inclinados de comprimento e alturas diferentes inscritos em um semicírculo (fig.4.16-d)

Esses teoremas se referem ao estudo comparativo dos tempos de descida de um mesmo móvel em diferentes planos e associa-se respectivamente à figuras 4.16, retiradas do estudo do “Movimento Naturalmente Acelerado” na terceira jornada dos *Discorsi* (1638).

Empregando a Geometria Euclidiana e alterando gradualmente os parâmetros dos planos analisados, Galileu chega ao teorema VI (fig.4.16-d), onde se prova com base nas conclusões dos casos anteriores que embora os dois planos inscritos em uma semicircunferência tenham comprimento e altura diferente um mesmo móvel ao descer por qualquer um dos planos inclinados o fará em tempos iguais. Esse raciocínio é conhecido como a Lei das Cordas.

Entretanto, percebemos que o resultado a que Galileu chega poderia simplesmente derivar da idéia que exploramos no tópico (4.3.1), pois como um triângulo retângulo está sempre inscrito em uma semicircunferência (Rezende, 2000), logo poderíamos, na figura 4.11, desenhar uma semicircunferência circunscrita ao triângulo ADC e teríamos;

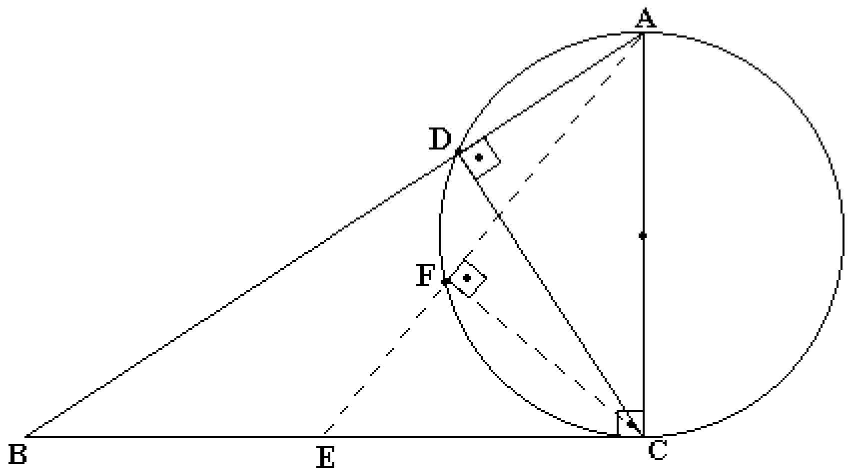


Figura 4.17 – O Plano Inclinado e a Lei das Cordas

Na figura 4.17, AD é terceira proporcional de AB e AC, foi provado que o tempo de descida ao longo de AD é igual à AC. Entretanto AF é também terceira proporcional de AE e AC, logo o tempo de descida ao longo de AF é igual à AC e também à AD. Como AC; AF e AD são cordas do círculo da figura temos aí a chamada Lei das Cordas.

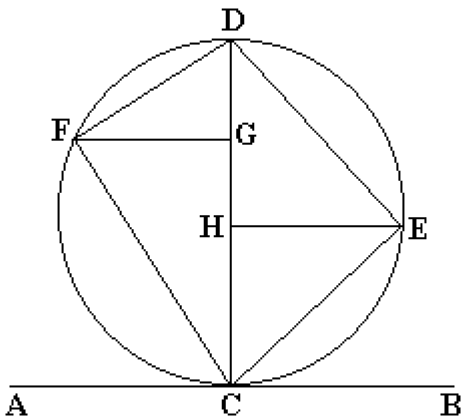


Figura 4.18 – A Lei das Cordas (Galileu, 1988,p.188)

A Lei das Cordas testa o senso comum[30] ao indicar que caminhos tão diferentes sejam percorridos no mesmo tempo. Essa lei prevê que, independente do caminho percorrido, uma esfera o descer ao longo de qualquer corda de um círculo que corte o seu ponto de maior altura ou o de menor altura (respectivamente os pontos D e C na figura 4.18) terão iguais

[30] O senso comum é visto por (Bachelard, 1996) como um dos obstáculos epistemológicos que impedem o desenvolvimento do espírito científico.

tempos de descida que a queda livre representada pelo segmento DC. Ou nas palavras do próprio Galileu:

> Sobre a linha horizontal AB tracemos um círculo, cujo diâmetro CD é perpendicular ao horizonte. A partir do ponto superior D tracemos um plano inclinado qualquer DF até a circunferência. Afirmo que um mesmo móvel empregará o mesmo tempo quando desce pelo plano DF que quando cai pelo diâmetro DC[31] [...] Demonstra-se da mesma maneira que, se a partir do ponto inferior C traçarmos uma corda CE e também a linha EH, paralela à horizontal, e unirmos depois os pontos E e D, então o tempo de descida por EC será igual ao tempo de descida pelo diâmetro DC. (Galileu, 1988,p.188).

Os *Discorsi* não apontam no sentido de haver indícios de que a Lei das Cordas tenha sido testada experimentalmente por Galileu, entretanto encontramos no acervo do IMSS um aparato de fabricante desconhecido (nº de inventário: 982), datado da segunda metade do séc. XVIII que consiste em um círculo de madeira (1,15m de diâmetro) fixo em uma base que sustenta também dois trilhos de inclinação variável com eixo de giro na base e o ápice do círculo (fig. 4.19).

Figura 4.19 – A Lei das Cordas (IMSS)

[31] Galileu, com essa citação, caracteriza de forma clara a Lei das Cordas, a qual também é demonstrada utilizando elementos da trigonometria no apêndice-E.

Nesse instrumento, o comprimento de cada trilho é limitado pela circunferência (corda). O dispositivo permite uma exploração teorema de Galileu se duas esferas iguais ao serem largadas simultaneamente da posição de máxima altura de cada corda chegarem ao mesmo tempo no fim do mesmo para qualquer combinação de inclinações possíveis.

Um trabalho baseado nesse tipo de resgate de um experimento histórico foi feito por Laterry, ao revisar uma experiência de pensamento da história da física e descrever sua aplicação em um curso de ciências físicas de nível secundário. Para isso, relacionou o fundo histórico e discutiu as suas aplicações educacionais (Lattery, 2001). Nesse processo, o senso comum dos alunos, um obstáculo epistemológico segundo Bachelard, é colocado à prova de forma eloqüente. Uma vez que as trajetórias são muito diferentes o que parece sugerir que os tempos de descida também o sejam.

Esse dispositivo serve também para mostrar algumas propriedades do pêndulo onde a altura máxima alcançada permanece a mesma, ainda que o comprimento seja alterado durante a oscilação (IMSS, 2005). Essa e outras aplicações desse dispositivo estão disponibilizadas também na forma de três simulações apresentadas no capítulo 5 (exp_h03.mdl; exp_h04.mdl e exp_h05.mdl).

CAPÍTULO 5 – ESTRATÉGIAS PARA SALA DE AULA

Ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua produção ou a sua construção

- Paulo Freire -

5.1 – Simulações de Experimentos Históricos

No nosso trabalho de reconstituição de um experimento histórico optamos por materializar esse trabalho através de simulações de computador pelas facilidades e vantagens que tratamos no tópico 3.5. Dessa forma foram construídos alguns modelos computacionais capazes de implementar e exemplificar algumas características dos experimentos que buscamos resgatar. Inicialmente restringimos esse esforço no sentido de reconstituir apenas o plano inclinado de Galileu e o aparelho usado para trabalhar a sua Lei das Cordas, entretanto dada à enorme riqueza de aspectos físicos com os quais nos deparamos, tomamos a liberdade de incluir mais oito simulações que se relacionam diretamente com o estudo da queda dos graves sob a ótica da mecânica de galileu abordada nos *Discorsi*.

Os itens que vem a seguir, relacionam-se com 10 simulações que estão no CD-ROM em anexo a esta. Cada item, que têm como nome o próprio arquivo referente à simulação, é essencialmente um texto de apoio voltado a explorar os aspectos mais ricos da simulação além de sugerir estratégias de utilização para o professor de Ensino Médio. Para isso são abordados: objetivos; formas de utilização; fragmentos originais e atividades práticas.

Nesse caso, a dimensão experimental que a prática laboratorial resgata dá lugar a meios virtuais, mas que procuram guardar ainda a fidelidade ao fenômeno físico (as equações empregadas seguem os modelos científicos atualmente aceitos) e a interatividade com o aluno (através da modelagem exploratória) é mantida. Os ruídos ao trabalho pedagógico que as experiências reais normalmente trazem foram minimizados, o que implica em uma maior objetividade do manuseio com o fenômeno, mas exige também a constante intervenção do professor no sentido de caracterizar essa prática não como a realização do experimento, mas como a exploração de uma de suas dimensões.

Entendemos que essas simulações serão sub-aproveitadas reduzindo-se a apenas mais um instrumento motivacional se forem trabalhas fora de um contexto de resgate da dimensão empírica da ciência dentro de uma abordagem de História da Ciência. Nesse caso vale a pena frisar que para isso as simulações devem ser empregadas como elementos acessórios das tradicionais abordagens textuais que normalmente balizam o ensino de historia da ciência. Ressaltamos ainda da importância de aproveitar a confrontação do senso comum com os resultados experimentas como instantes de enorme riqueza no processo de ensino por darem margem a uma possível quebra de obstáculos e ao natural aprimoramento dos conceitos científicos. Alem disso os experimentos, agora traduzidos através de simulações, podem e devem servir de elementos mediadores capazes de estabelecer um diálogo horizontal do indivíduo com os outros sujeitos desse processo.

Nos experimentos de 01 a 09 consideramos os sistemas isentos de forças de atrito de qualquer natureza onde os móveis (quase sempre esferas) escorregam sem rolamento. No experimento 10, o usuário pode escolher em considerar ou não o movimento de rotação do móvel, o que altera substancialmente a dinâmica do movimento, pois, como abordamos no tópico 4.3.4, no movimento com rolamento há considerável transferência de energia cinética para rotação.

Essas simulações estão gravadas no CD-ROM em anexo. Para maiores informações de como ter acesso a elas veja o Anexo-G.

Exp_h01.mdl – Plano Inclinado de Galileu (Segundo os *Discorsi*)

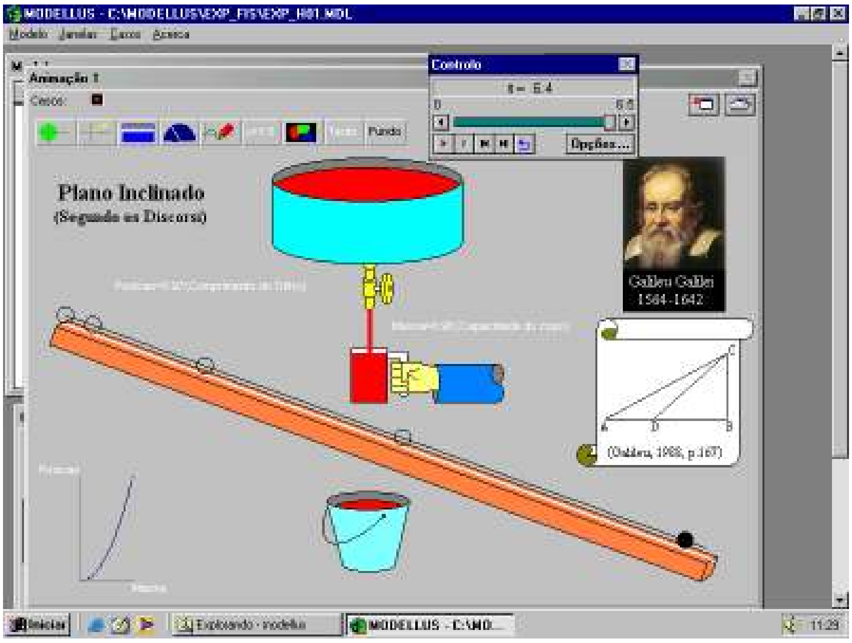


Figura 5.1 – Simulação da dinâmica de funcionamento do plano inclinado de Galileu conforme descrito nos Discorsi, no ambiente do aplicativo Modellus.

Objetivos: *Perceber o plano inclinado como uma ferramenta no estudo de queda dos corpos.*

Uso: *No caso da simulação, o usuário tem controle sobre o início e o término do movimento de forma que ao parar o movimento da esfera em qualquer lugar do trilho (tecla pause), poderá extrair sua posição (medindo com uma régua ou lendo diretamente a variável "posição") e o instante (representado pela massa de água recolhida, essa diretamente proporcional ao seu volume (lido diretamente na variável "volume")).*

Aspecto a explorar: *a verificação de que mesmo com um instrumental tão limitado é possível se retirar importantes conclusões.*

Galileu representou um marco na ciência também pelo uso da experimentação como ferramenta de análise da natureza. Nessa atividade, poderemos explorar alguns de seus teoremas empregando uma simulação baseada em um fragmento de sua obra.

Galileu mostra através de uma experiência de pensamento (tópico 3.4.1) a simultaneidade dos movimentos de queda, entretanto o seu estudo, na prática esbarrou nas enormes dificuldades de se realizar medidas em curtos espaços de tempo. Galileu soluciona esse problema ao perceber a relação de proporcionalidade entre um movimento de queda livre e o escorregamento de um móvel em uma superfície inclinada, este de mais fácil medida. O plano inclinado torna-se uma formidável ferramenta de estudo que passa a ser explorado tanto experimentalmente quanto teoricamente através da geometria que o constitui. O fragmento abaixo descreve a forma de construção e o funcionamento desse plano. Após fazer uma leitura, interaja com a simulação[32] a fim de verificar se é de fato possível fazer o que foi dito. Observe que além do movimento da esfera é apresentado o dado de posição e "tempo" de forma adimensional, além de um gráfico em tempo real.

Fragmento:

> Numa ripa ou, melhor dito, numa viga de madeira com um comprimento aproximado de 12 braças, uma largura de meia braça um lado a três dedos no outro, foi escavada uma canaleta perfeitamente retilínea, para ficar bem polida e bem limpa foi colocada uma folha de pergaminho que era polida até ficar bem lisa; fazíamos descer por ele uma bola de bronze duríssima perfeitamente redonda e lisa. Uma vez construído o mencionado aparelho, ele era colocado em uma posição inclinada, elevando sobre o horizonte uma de suas extremidades até a altura de uma ou duas braças, e se deixava descer (como afirmei) a bola pela canaleta, notando como explorei mais adiante o tempo que empregava para descida completa; repetindo a mesma experiência muitas vezes para determinar a quantidade de tempo, na qual nunca se encontrava uma diferença nem mesmo da décima parte de uma batida de pulso. Feita e estabelecida com precisão tal operação, fizemos descer a mesma bola apenas por uma quarta parte do comprimento total da canaleta; e, medido o tempo de queda, resultava ser sempre rigorosamente igual à metade do outro, Variando a seguir a experiência e comparando o tempo requerido para percorrer todo o comprimento com o tempo requerido para percorrer a metade, ou os dois terços, ou os três quartos, ou para concluir qualquer outra fração, por meio de experiências repetidas mais de cem vezes, sempre se encontrava que os espaços percorridos estavam entre si como os quadrados dos tempos e isso em todas as inclinações do plano, ou seja, da canaleta, pela qual se fazia descer a bola. Observamos também que os tempos de queda para as diferentes inclinações do plano mantinham exatamente entre si a proporção que, como veremos mais adiante, foi encontrada e demonstrada pelo autor. No que diz respeito à medida do tempo, empregávamos uma grande recipiente cheio água, suspenso no alto, o qual, por meio de um pequeno orifício feito no fundo, deixava cair um fino fio de água, que era recolhido num pequeno copo durante todo o tempo em que a bola descia pela canaleta ou por suas partes. As quantidades de água assim recolhidas eram a cada vez pesadas com uma balança muito precisa, sendo as diferenças e proporções entre os pesos correspondentes às diferenças e proporções entre os tempos; e isto com tal precisão que, como afirmei, estas operações, muitas vezes repetidas, nunca diferiam de maneira significativa. (Galileu, 1988,p.175).

<u>Sugestões de questões a serem levantadas</u>

1. O texto trabalha com alguma unidade que você não conhece? Qual?

[32] Essa simulação reconstitui tal qual descrito nos *Discorsi* o experimento de Galileu, não apenas no que diz respeito aos materiais empregados, mas também a metodologia empregada para conduzir o experimento. A Clepsidra goteja água à uma razão aproximadamente constante de forma que o volume do líquido recolhido ou o seu peso sirva como unidade de medida de tempo. A ripa de madeira inclinada funciona como um plano inclinado sobre o qual se fez uma talha bem polida e recoberta com pergaminho a fim de servir de trilho para uma esfera de bronze.

2. Os materiais empregados no experimento são bastante precários, principalmente o relacionado a medir o tempo. Sabendo que a caneca demora 3 minutos para encher completamente, quanto tempo indica uma medida de 5/12 do seu volume?
3. Uma das primeiras observação de Galileu frente aos resultados do experimento é que para percorrer toda a ripa o tempo não variava para a mesma inclinação. Mas o tempo para percorrer ¼ da ripa era a metade do gasto para percorrer a ripa inteira. Isso é verdade?
4. Considerando ainda, que o copo gaste 3 minutos para encher completamente, determine o tempo gasto para que a esfera percorra: 0; 1; 4 e 9 unidades de comprimento (UC).

S= posição (UC)	**t = tempo (s)**

Plote os pontos em uma folha de papel milimetrado.

5. É possível perceber alguma correlação entre os dados acima? Qual?
6. a) Faça dez medidas quaisquer de posição e tempo ao longo do trilho e plote esses pontos em um gráfico (S & t). b) Que curva é essa?
7. Tente expressar essa conclusão de forma matemática:
8. a) Usando os mesmos dados do exercício anterior, calcule a velocidade média em cada medida e faça um gráfico (V & t). b) Que curva é essa?

Exp_h02.mdl – Plano Inclinado de Galileu (*IMSS*)

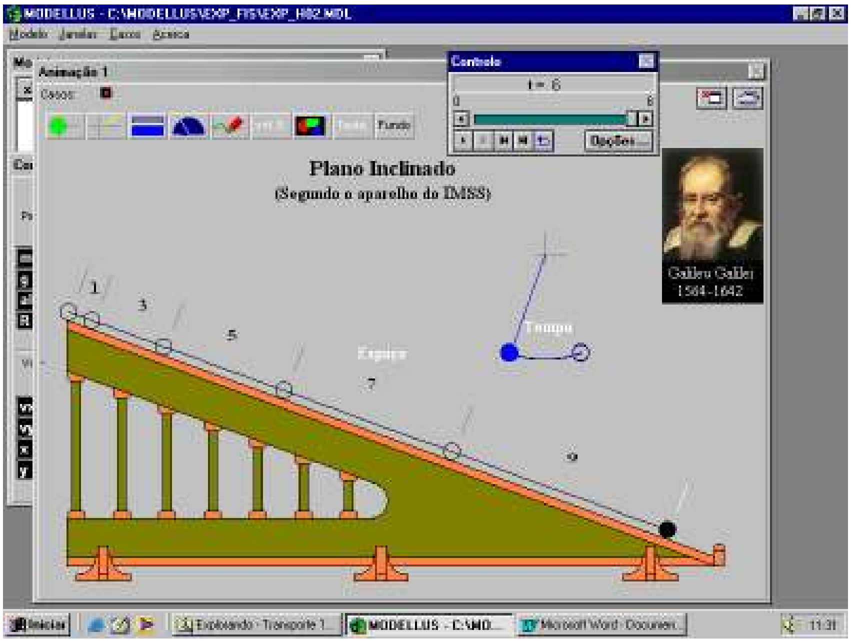


Figura 5.2 – Simulação da dinâmica de funcionamento do plano inclinado de Galileu conforme a reconstituição do IMSS (fig.4.9), no ambiente do aplicativo *Modellus*.

Objetivos: *Explorar a "Lei dos Números Impares Consecutivos" e suas conseqüências.*

Uso: *No caso da simulação, o usuário tem controle sobre o início e o término do movimento. Se não houver intervenção será possível perceber que a esfera irá percorrer espaços cada vez maiores em um mesmo intervalo de tempo (Período de oscilação do pêndulo). Esses espaços, por sua vez, formarão uma série de números impares consecutivos.*

Aspecto a explorar: *O uso do pêndulo como "relógio".*

Essa simulação embora similar à anterior usa como argumento uma versão do plano inclinado de Galileu pertencente ao acervo do Museu e Instituto de História da Ciência em Florença (IMSS). Tem como apelo didático a capacidade de reunir duas características importantes da obra de Galilei:

- ✓ O isocronismo do pêndulo[33]
- ✓ A lei dos números ímpares (tópico 4.2.3)

A simulação mostra de forma clara que considerando intervalos de tempos iguais, os espaços percorridos são proporcionais aos quadrados dos tempos confirmando a relação (4.4). Se por outro lado, observarmos as distâncias percorridas a cada ½ oscilação do pêndulo, estas

---

[33] Ver nota 19.

obedecerão a série nos números inteiros ímpares. O recurso de movimento estreboscópico foi empregado tanto para o pêndulo como para a esfera de forma a tornar clara essas relações.

Sugestões de questões a serem levantadas

1. Considerando que o período do pêndulo é dado pela expressão abaixo. Determine o comprimento (L’) que um outro pêndulo deveria ter para que 1 oscilação completa gaste o mesmo tempo que ½ oscilação no pêndulo da simulação.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad \textbf{(A.6)}$$

Exp_h03.mdl – Lei das Cordas

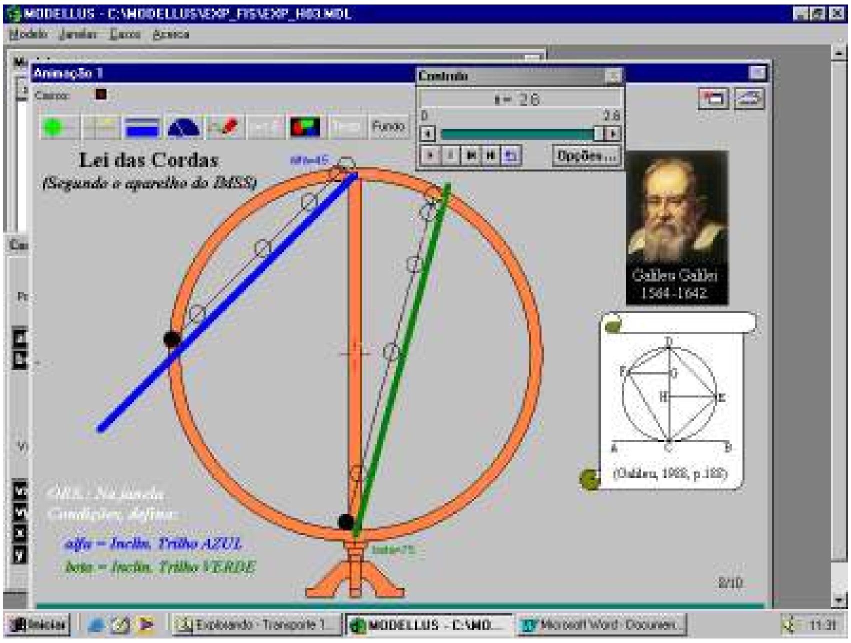


Figura 5.3 – Simulação do movimento de descida, independente da corda escolhida, de duas esferas nos trilhos do instrumento da figura 4.19, no ambiente do aplicativo *Modellus*.

Objetivos: *Colocar-se frente ao senso comum que indica que o caminho de menor tempo é o mais curto ou o de maior inclinação;*

Uso: *Antes de dar início à simulação o usuário poderá alterar as inclinações dos planos digitando na janela "Condições" um ângulo entre 0 e 90º.*

Aspecto a explorar: *A corda como um caso particular de plano inclinado.*

A chamada "Lei das Cordas" de Galileu surge em decorrência do aprofundamento do estudo das relações geométricas existentes no movimento de um grave sobre um trilho inclinado e em um primeiro momento parece testar o senso comum da maioria das pessoas. Usando como referência o esquema da figura 4.18, veja o que Galileu nos diz a esse respeito.

Fragmento:

> Sobre a linha horizontal AB tracemos um círculo, cujo diâmetro CD é perpendicular ao horizonte. A partir do ponto superior D tracemos um plano inclinado qualquer DF até a circunferência. Afirmo que um mesmo móvel empregará o mesmo tempo quando desce pelo plano DF que quando cai pelo diâmetro DC. (Galileu, 1988,p.188).

Além da geometria euclidiana o emprego da trigonometria também nos leva aos mesmos resultados (apêndice-E). Um aparato foi concebido a fim de verificar e demonstrar de forma real essa lei. Este aparelho, pertencente ao IMSS é retratado pela fig (4.19). Com base nos elementos dessa imagem e na dinâmica que envolve um aparato dessa natureza construímos uma animação (fig. 5.3) que essencialmente apresenta um par de trilhos de inclinação ajustável [0º;90º] cujo comprimento útil é delimitado pela corda do círculo de mesma inclinação que lhe dá suporte. O vínculo histórico é destacado pela reprodução do esquema explicativo da mesma lei à direita da simulação. Esse esquema já foi apresentado na figura (4.18). Essa simulação mostra que embora percorrendo espaços diferentes e com diferentes inclinações, as esferas gastam o mesmo tempo nos dois trilhos. Um caso particular dessa simulação é o emprego de uma inclinação de 90º para uma dos planos, nesse caso o movimento será uma queda livre ao longo da diagonal (máxima corda) do círculo de forma similar ao exemplo abordado no apêndice-E.

Os alunos ao serem questionados sobem essa situação normalmente alegam que o móvel percorrerá os trilhos em tempos diferentes, nesse caso esse tipo de colocação pode servir de questão capaz de desencadear a quebra de um obstáculo epistemológico no que diz respeito à queda dos corpos.

Sugestões de questões a serem levantadas

1. Você consegue enxergar um plano inclinado na figura 5.3?
2. Considerando as inclinações dos trilhos em relação à horizontal: alfa=25º e beta=65º. a)Qual das duas cordas tem maior comprimento? b)Qual das duas é percorrida no menor tempo? c) Por quê?
3. Use a animação em diversos ângulos. Os tempos são semelhantes?
4. Galileu chega a essa conclusão empregando a Geometria Euclidiana, entretanto a mesma conclusão pode ser conseguida com maior simplicidade através da trigonometria. Demonstre usando a trigonometria a igualdade dos tempos, para alfa=45º e beta=90º (queda livre).
5. É possível chegar a essa conclusão usando o trilho da animação: exp_h10.mdl ?

Exp_h04.mdl – Conservação da Energia (Pêndulo→Plano Inclinado)

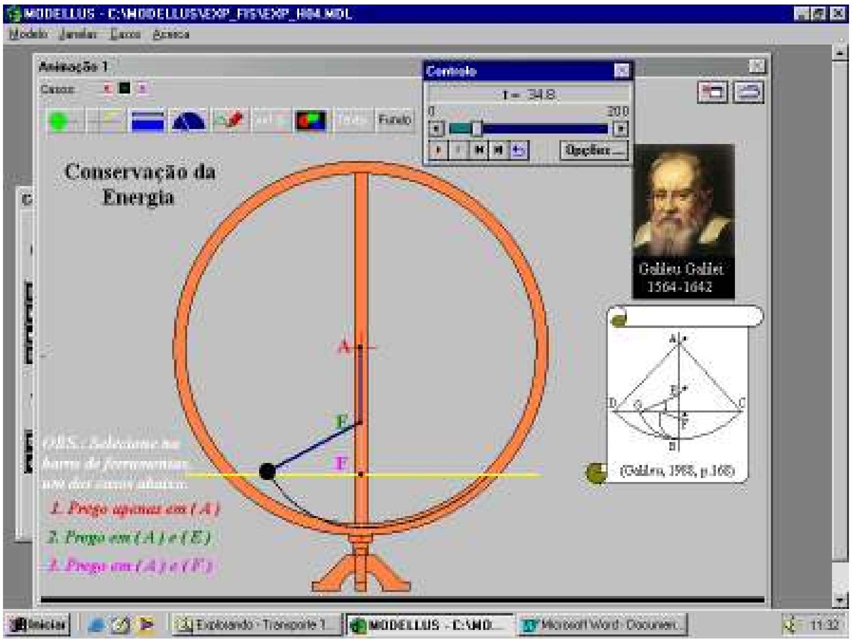


Figura 5.4 – Simulação do movimento de um pêndulo, destacando a sua altura máxima atingida, suspenso no instrumento da figura 4.19, no ambiente do aplicativo *Modellus*.

Objetivos: *Explorar a dimensão do estudo comparativo de Galileu que extrapola para o plano o que era válido para o arco de círculo (pêndulo).*

Uso: *Ao iniciar a simulação um pêndulo simples irá iniciar um movimento de oscilação suspenso no ponto A . Apertando os botões "**casos**" será possível escolher outro ponto de suspensão durante o movimento oscilatório,*

Aspecto a explorar: *A questão da conservação da energia mecânica.*

A terceira aplicação do instrumento se refere à prova do postulado de Galileu: "Os graus de velocidade alcançados por um mesmo móvel em planos diferentemente inclinados são iguais quando as alturas desses planos também são iguais" (Galileu,1988,p.167). Que se refere à figura 4.8 deste trabalho, segundo o qual as velocidades alcançadas por um móvel ao descer um plano inclinado de mesma altura seriam iguais, independente da inclinação destes. Para a prova, Galileu extrapola o que era válido no pêndulo para o plano inclinado. O esquema a seguir (fig. 5.5), um dos primeiros na sua análise do movimento naturalmente acelerado, mostra que as alturas alcançadas por um pêndulo de comprimento variável (AB; EB ou FB) que em qualquer um dos três casos atinge sempre uma altura máxima pertencente ao segmento horizontal DC.

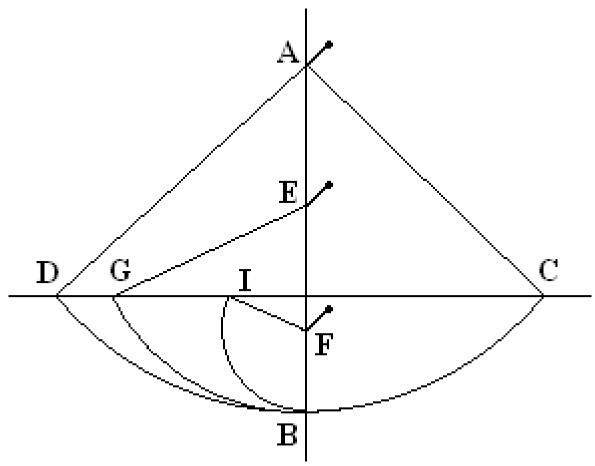


Figura 5.5 – Extraído de (Galileu, 1988,p.168)

Fragmento:

Salviati – O seu raciocínio é muito plausível; mas, além do verossímil, quero por meio de uma experiência aumentar tanto sua probabilidade que pouco lhe faltará para ser uma demonstração necessária. Imagine que esta folha de papel é um muro vertical e que um prego fixado nele pende uma bola de chumbo de uma ou duas onças, suspensa por um fio muito fino AB, com duas ou três braças de comprimento, perpendicular ao horizonte, e desenhem na parede uma linha horizontal DC que corte em ângulo reto a perpendicular AB, que estará separada da parede aproximadamente dois dedos. Conduzindo posteriormente o fio AB coma a bola até AC, soltem essa bola: num primeiro momento veremos que ela desce descrevendo o arco CDB e ultrapassando o ponto B tanto que, percorrendo o arco BD, chegará quase à paralela traçada CD, não chegando a toca-la por um pequeno intervalo, o que é causado pela resistência que impõe o ar e o fio. Disto podemos perfeitamente concluir que o ímpeto adquirido pela bola no ponto B, ao transpor o arco CB, foi suficiente para eleva-la segundo um arco similar BD à mesma altura. Após efetuar e repetir muitas vezes esta experiência fixemos no muro, próximo à perpendicular AB, como por exemplo em E ou F, um prego que sobressaia da parede cinco ou seis dedos, a fim de que o fio AC, voltando a conduzir como antes a bola C pelo arco CB, encontre, quando chegar a B, o prego E, sendo a bola obrigada a descrever a circunferência BG com centro em E. Constataremos assim o que pode fazer o mesmo ímpeto que, engendrado no ponto B, faz subir o móvel pelo arco BD até a altura da linha horizontal CD. Constataremos então com prazer que a bola chega até a linha horizontal no ponto G, e o mesmo aconteceria, se o prego estivesse fixado mais baixo, por exemplo, no ponto F, no caso em que a bola descreveria um arco BI, terminando sempre a sua subida precisamente na linha CD. Se, enfim, o prego fosse fixado tão baixo, que a parte do fio que ultrapassa o prego não chegasse a alcançar a linha CD, então o fio se chocaria com o prego, enrolando-se neste. Esta experiência não deixa lugar para duvidar da verdade da suposição: com efeito, sendo os dois arcos CB e DB iguais e simétricos, o momento adquirido durante a descida pelo arco CB é o mesmo que aquele adquirido pela decida segundo ao arco DB; mas o momento adquirido em B segundo o arco CB é suficiente para erguer o mesmo móvel BD; portanto, também o momento adquirido durante a descida DB é igual àquele que ergue o móvel pelo mesmo

> arco de B até D. Assim, de modo geral, todo momento adquirido durante a descida por uma arco é igual àquele que pode fazer subir o mesmo móvel pelo mesmo arco. Ora, todos os momentos que provocam uma subida através dos arcos BD, DG, BI são iguais, visto que são produzidos pelo mesmo momento adquirido durante a descida CB, como mostra a experiência; logo, todos os momentos que são adquiridos durante as descidas pelos arcos DB, GB, IB são iguais. (Galileu, 1988,p.167).

Essa conclusão, hoje óbvia sob a ótica da conservação da energia mecânica, se mostra duplamente poderosa: em primeiro lugar por estarem corretas, mas principalmente por ser extrapolada a uma outra situação, no caso o plano inclinado.

A animação que propomos lança mão da estrutura empregada para demonstração da Lei das Cordas substituindo os planos móveis por um pêndulo de comprimento igual ao raio do círculo e suspenso no seu centro “A”.

Esse pêndulo é posto a oscilar livremente e desconsideradas as forças resistivas naturalmente sempre atinge a altura representada pelo segmento de reta vermelha. Durante o movimento de oscilação do pêndulo o usuário do programa pode alterar livremente a posição do ponto de suspensão para “A”, “E” ou “F”. Observamos, com isso, que embora alterado o comprimento do pêndulo a altura máxima atingida será constante.

Sugestões de questões a serem levantadas

1. Considerando os segmentos AC e DC respectivamente iguais a 1m e 2m. Determine a menor distância FB que permita que o móvel atinja o nível DC.
2. “Galileu, que sempre trabalhou com proporções e não com valores absolutos, não determinou o fator de proporção da lei que liga o período “T” à raiz quadrada do cumprimento “L” do pêndulo (eq. A.6), assim como nunca determinou o valor da aceleração da gravidade “g”, que é o fator de proporcionalidade que liga o dobro do espaço para percorrer “E” em queda livre ao quadrado do tempo de queda “t” (eq. 4.6). No entanto Stilman Drake, examinando manuscritos de Galileu arquivados na Biblioteca Nacional de Florença descobriu que Galileu determinou experimentalmente, com admirável precisão, a relação entre o quarto do período de oscilação do pêndulo (T/4) e o tempo de queda vertical ao longo do comprimento do pêndulo. Essa relação, igual a $\pi/(2\sqrt{2})$, foi denominada por Drake, Constante de Galileu” (Carneiro, 1989,p.36-37). Determine usando as equações A.6 e 4.6 a Constante de Galileu.

Exp_h05.mdl – Tempo de queda (Plano Inclinado & Circunferência)

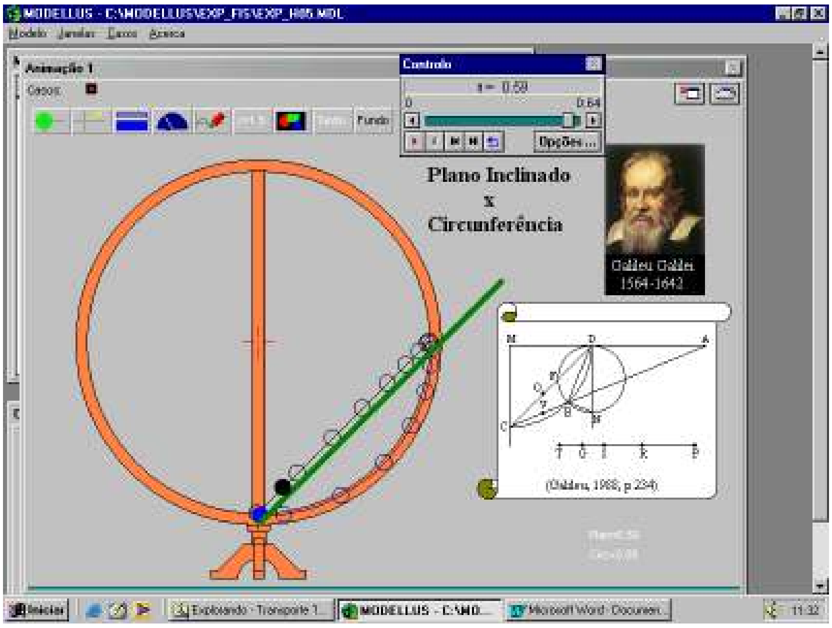


Figura 5.6 – Simulação do movimento de descida de esferas sobre o arco de círculo e sobre a corda de um quadrante do círculo do instrumento da fig.4.19, no ambiente do aplicativo *Modellus*.

Objetivos: *Colocar-se frente ao senso comum que indica que o caminho de menor tempo é a reta.*

Uso: *É possível acompanhar as trajetórias simultâneas de duas esferas iguais por dois caminhos: o plano inclinado e o arco de círculo de um quadrante. Sendo esse último percorrido em tempo inferior embora seja mais longo.*

Aspectos a explorar: *Cálculo do tempo de descida de um corpo em um plano inclinado conhecendo seu comprimento e inclinação. Desenvolver noções relacionadas ao conceito de limite.*

Esse experimento tem como mérito mostrar a fenomenal capacidade de Galileu de explorar as situações no seu limite. No teorema XXII da terceira jornada dos *Discorsi*, Galileu demonstra, usando elementos da Lei das Cordas, que considerando o arco de círculo DC (fig. 5.7), o tempo gasto para um móvel percorra as cordas DB e BC (de mesmo comprimento) será menor que o tempo gasto para percorrer as corda DC.

Fragmento:

> A partir do ponto mais baixo de um círculo CBD, a saber C, tomemos um arco que não é maior que um quadrante, no qual traçamos o plano inclinado CD e, depois, a partir dos pontos C e D tracemos dois outros planos inclinados até um ponto B do arco. Afirmo que o tempo de descida pelos dois planos DB e BC é menor que o tempo de descida por DC, ou por apenas BC, partindo do repouso em B. (Galileu, 1988,p.243).

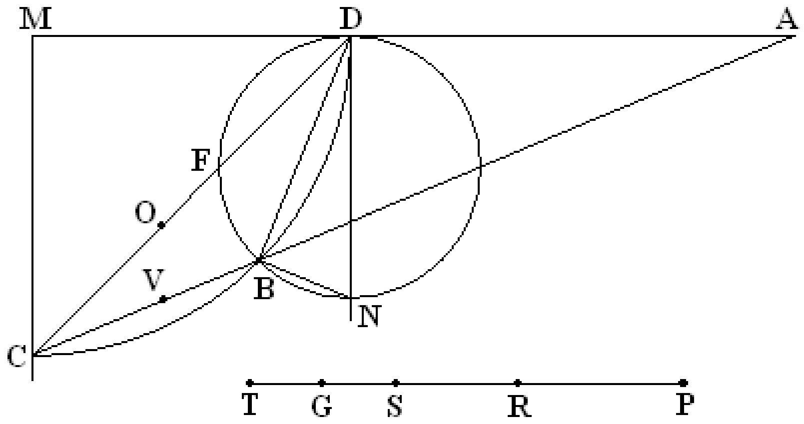


Figura 5.7 – Extraído de (Galileu, 1988,p.234)

Demonstra ainda que o tempo será menor ainda para três segmentos iguais e conseqüentemente menores à medida que se aumente o número de segmentos. Estes teriam, numa situação limite, comprimento tendendo a zero e número tendendo ao infinito. Nesse caso a figura formada se aproximaria de um círculo. Usando recursos do cálculo numérico é fácil demonstrar[34] que:

$$\frac{t_{\text{arco(DC)}}}{t_{\text{plano(DC)}}} = 0{,}927 \tag{5.12}$$

Ainda segundo Galileu, a demonstração embora tenha sido feita para o quadrante de um círculo o mesmo seria válido para círculos menores.

A simulação (fig.5.6) que propomos visa demonstrar que o móvel percorrerá o arco de círculo em tempo inferior ao gasto para percorrer a corda que una os mesmos pontos. Nela é nítido para o usuário que o segmento de arco é percorrido em menor tempo, pois a esfera atinge a base do círculo antes que a esfera que percorreu a corda do círculo. Isso pode suscitar dúvidas no aluno uma vez que um espaço maior (arco do círculo) deveria ser percorrido em um tempo também maior.

Ao empregar o pêndulo simples para resolver alguns problemas relativos ao plano inclinado, Galileu faz duas considerações que posteriormente se mostraram equivocadas. A primeira é concernente ao isocronismo das oscilações de um pêndulo o que posteriormente foi demonstrado por Huygens ser válido apenas para as pequenas oscilações. A segunda se refere

---

[34] O algoritmo foi feito usando os recursos de uma planilha eletrônica do Microsoft Excel conforme explanado no apêndice-F.

ao círculo onde tempo gasto para que um móvel percorra um arco de círculo é o menor: "quanto mais nos aproximarmos da circunferência pelo número de polígonos inscritos menor é o tempo necessário para percorrer a distância entre os pontos" (Galileu, 1988,p.236). Embora o arco de círculo seja percorrido em um tempo inferior à corda do mesmo segmento, foi demonstrado por Newton e Bernoulli que o tempo de queda ainda seria menor na ciclóide, que é braquistócrona[35]; e não o círculo, como supunha Galileu (Carneiro, 1989,p.36).

Sugestões de questões a serem levantadas

Nas questões a seguir, considere MD=1m e g=9.81m/s^2.

1. Determine o tempo gasto para que uma partícula percorra o segmento DC da figura 5.7.
2. Determine agora o tempo em que a mesma partícula percorre os segmentos DB e BC.
3. Qual dos dois percursos é realizado em menor tempo?
4. Como tornar o tempo menor ainda?
5. Considerando uma situação limite onde o número de plano tendesse ao infinito essa figura seria semelhante qual forma geométrica?
6. Determine o comprimento do plano inclinado e do arco de círculo.
7. Usando a simulação exp_h5.mdl determine a razão entre o tempo gasto para percorrer o plano inclinado e o tempo gasto para percorrer o arco que une os extremos de um quadrante do círculo.

[35] Braquistócrona - Curva de menor tempo, do grego: (*brachystos* → brevíssimo) + (*chronos* → tempo).

Exp_h06.mdl – Viagem ao Centro da Terra (*Gendankenexperiment*)

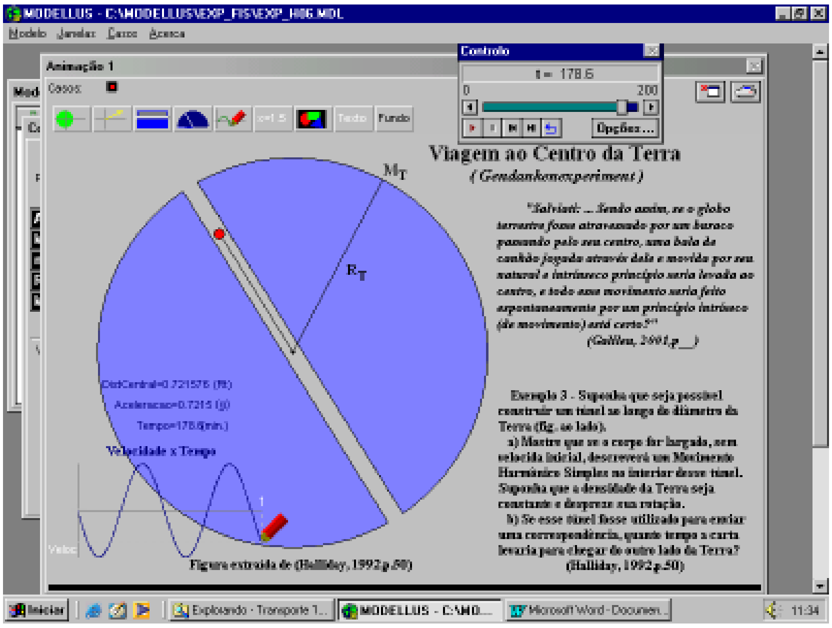


Figura 5.8 – Simulação da experiência de pensamento de Galileu onde uma partícula cai em um buraco que a travessa o centro da Terra.

Objetivos: *Visualizar o movimento um movimento de queda onde a aceleração gravitacional seja função da posição em relação ao centro da Terra.*

Uso: *A simulação mostra a posição da partícula além de traçar um gráfico de velocidade em função do tempo e de mostrar dados de profundidade e aceleração gravitacional.*

Aspecto a explorar: *A experiência de pensamento como fonte de interessantes problemas de física.*

Dentre os vários usos que as experiências de pensamento podem ter no Ensino de Ciências, Lattery os destaca como uma fonte de problemas desafiadores para os estudantes (Lattery, 2001). Nos *Diálogos* de Galileu encontramos um exemplo que pode exemplificar essa categoria de emprego para as experiências de pensamento. Ao abordar a questão da ação gravitacional Galileu nos diz:

Fragmento:

> Salviati: ... Sendo assim, se o globo terrestre fosse atravessado por um buraco passando pelo seu centro, uma bala de canhão jogada através dele e movida por seu natural e intrínseco princípio seria levada ao centro, e todo esse movimento seria feito espontaneamente por um princípio intrínseco (de movimento) está certo?”
>
> Simplício: Eu acredito que sim.

> Salviati: Mas tendo chegado ao centro, você acredita que ele proseeguiria, ou seu movimento cessaria imediatamente?
>
> Simplicio: Penso que ele continuaria seguindo um longo caminho.
>
> Salviati: Agora, não poderia esse movimento para além do centro ser ascendente, e de acordo com o que você disse, ser acima do natural e forçado? Mas de que outro princípio você faria depender, além daquele próprio levou a bala ao centro, e que você acaba de chamar de intrínseco e natural? Deixe-me vê-lo encontrar um motor externo que retomasse a bala para atirá-la para cima. (Galileu, 2001,p.317).

Esse problema de analisar a queda de um corpo dentro de um túnel que perfure toda a Terra é uma dos problemas clássicos de mecânica, desdobrando-se em diversas variantes (Carneiro, 1989,p.106) das quais destacamos o problema proposto por Halliday que emprega essa situação a fim de ilustrar um movimento harmônico simples (Halliday, 1992,p.50).

Sugestões de questões a serem levantadas

1. Relacione alguns empecilhos práticos para a execução desse experimento?
2. Responda os itens "a" e "b" do problema proposto por Halliday. O enunciado do problema está na própria simulação.

Exp_h07.mdl – Queda do Martelo e a Pena (*Feather Drop*)

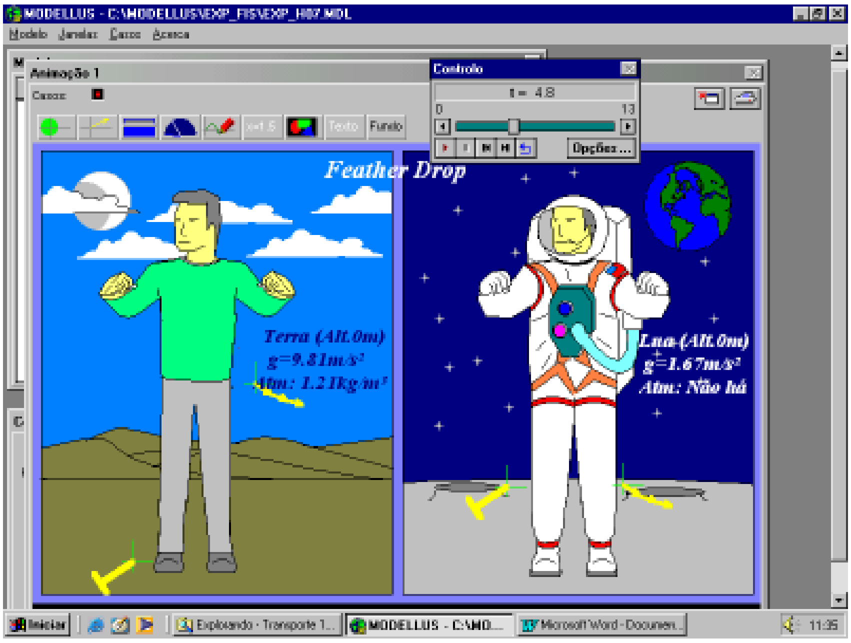


Figura 5.9 – Simulação da queda livre de uma pena e um martelo na Terra e na Lua, no ambiente do aplicativo *Modellus*.

Objetivos: *Evidenciar a enorme relevância da resistência do ar no movimento de queda livre.*

Uso: *Ao acionar a simulação os movimentos de queda de dois corpos diferentes (um martelo e uma pena) irão ocorrer em dois locais diferentes (Superfície da Terra e da Lua)*

Aspecto a explorar: *resgatar a preocupação de Galileu com os chamados "obstáculos acidentais".*

Ao longo da obra de Galileu é constante a sua preocupação com o que denominou de obstáculos acidentais. Uma vez que seus teoremas e postulados eram válidos apenas se as forças dissipativas não fossem muito significativas em relação ao movimento. Usando uma experiência de pensamento Galileu prova a igualdade dos tempos de queda contrariando a física aristotélica (tópico 3.4.1), mas estipula uma condição para a sua validade:

Fragmento:

> 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 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. (Galileu, 1988,p.69).

Os meios menos resistentes a que Galileu se refere, tão difíceis de se conseguir na sua época, podem ser obtidos facilmente com o emprego de um tubo de Newton que é um recipiente de vidro do qual pode-se obter vácuo ao extrair o ar do seu interior com uma bomba. Outro lugar onde encontramos o vácuo é na superfície da Lua, pois o satélite da Terra é desprovido de atmosfera. A simulação retrata uma comparação entre a queda de corpos bem diferentes (um martelo e uma pena) na Terra, onde as forças de resistência são significativas e na Lua onde elas não existem. Essa experiência foi feita em agosto de 1975 pelo comandante da *Apollo 15,* David R. Scott.

Exp_h08.mdl – A Terceira Proporcional de “h” e “L”

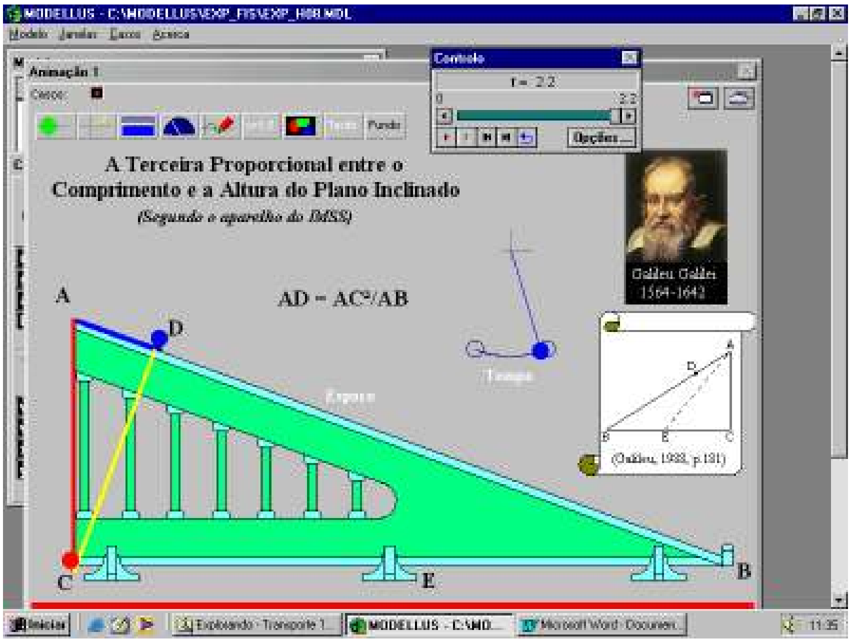


Figura 5.10 – Simulação da relação geométrica entre o espaço percorrido pelo corpo no plano inclinado com o espaço de queda no mesmo período, no ambiente do aplicativo *Modellus*.

Objetivos: *Explorar a dimensão geométrica descoberta por Galileu.*

Uso: *observação do movimento de queda de um corpo que ocorre simultaneamente a descida de um outro pelo plano inclinado.*

Aspecto a explorar: *a terceira proporcional no plano inclinado.*

A eficiência do plano inclinado como ferramenta de estudo pode ser evidenciada geometricamente pela relação existente entre o espaço percorrido (AD) e altura (AC) e o comprimento do plano inclinado (AB). Essa relação que deriva da Média Geométrica (Apêndice D) é uma terceira proporcional. Sobre isso, Galileu nos diz:

Fragmento:

> [...] o móvel no mesmo tempo em que percorrer o espaço vertical AC, percorrerá também o espaço AD no plano inclinado AB (sendo os momentos como os espaços), e o grau de velocidade em C estará para o grau de velocidade em D na mesma proporção que existe entre AC e AD. (Galileu, 1988,p.181)

Apesar dessa explanação concordar com o princípio ao qual nos referimos anteriormente, a caracterização do ponto D se torna clara quando Salviati nos diz na mesma página da citação acima “tomemos no plano inclinado AB, AD como terceira proporcional de AB e AC” (Galileu, 1988,p181). Geometricamente, o significado dessa relação é:

$$AD = \frac{AC^2}{AB} \qquad \textbf{(4.7)}$$

Essa relação, quase nunca explorada nos cursos de Física tem uma enorme capacidade de síntese á medida que vincula dois movimentos tão diferentes (a queda livre e a descida pelo plano inclinado) através de uma simples proporção geométrica, confirmando a máxima de Galileu: “O livro da natureza está escrito em caracteres matemáticos” (Galileu, 2001).

Sugestões de questões a serem levantadas

1. Usando a trigonometria e as relações de cinemática, prove a equação (4.7)

Exp_h09.mdl – Caminho de menor tempo (Plano Inclinado & Ciclóide)

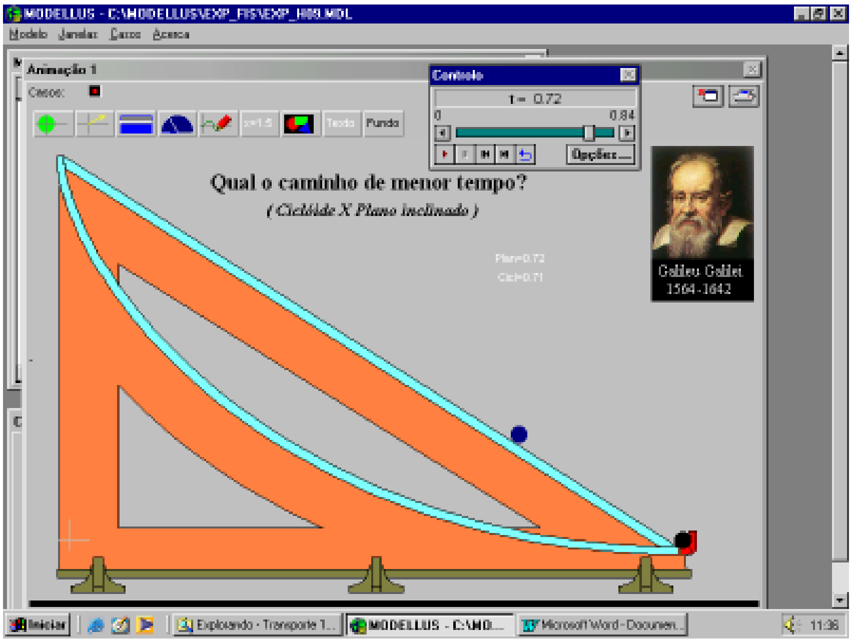


Figura 5.11 – Simulação da comparação entre um movimento de uma partícula em um plano inclinado e em uma ciclóide, no ambiente do aplicativo *Modellus*.

Objetivos: *Colocar-se frente ao senso comum que indica que o caminho de menor tempo é o mais curto.*

Uso: *Essa simulação tem duas animações, a "**Animação 1**" mostra de forma similar ao exp_h05, uma comparação entre o movimento de um móvel sobre duas curvas, nesse caso, um plano e uma ciclóide. A "**Animação 2**" procura mostrar a forma dessa curva de uma forma prática. Escolha a animação clicando na barra de título de cada uma ou selecionando-a na barra de ferramentas: Janela\Animação.*

Aspecto a explorar: *apresentação da ciclóide como a braquistócrona e como a tautócrona.*

Essa simulação, inspirada no aparato construído por Francesco Spighi na segunda metade do séc. XVIII e pertencente ao acervo do IMSS (IMSS, 2005). Compara o tempo de descida de duas curvas: o plano inclinado e ciclóide (fig. 5.12).

Figura 5.12 – Braquistócrona (IMSS)

Embora o arco de círculo seja percorrido em menor tempo que o plano inclinado, Galileu erroneamente acreditou ser o círculo a curva de menor tempo, ou seja, a braquistócrona. Entretanto a ciclóide é a curva mais rápida, ou seja, a braquistócrona conforme foi demonstrado por J.Bernoulli em 1906 e por Leibniz, L´Hopital e Newton (independentemente). Embora matematicamente a ciclóide tenha de ser expressa através de funções paramétricas, essa curva é facilmente obtida através da trajetória de um ponto em um círculo ao girar sobre uma superfície plana. Veja a animação exp_h09.mdl (Animação 2).

Galileu também atribuiu erroneamente ao movimento do pêndulo (arco de círculo) ser isócrono, entretanto Mersenne em 1644 (experimentalmente) e Huygens (teoricamente) provam que a linha tautócrona[36] de queda é a ciclóide e não o círculo.

<u>Sugestões de questões a serem levantadas</u>

1. A tabela a seguir ilustra algumas coordenadas da comparação de curvas clássicas: (Ciclóide & Plano Inclinado). Usando os dados dessa tabela plote em uma folha de papel milimetrado, tamanho A4. Qual parece ser mais rápida? Por quê?

	Ciclóide		**Plano Inclinado**	
n	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
0	0,0	17,0	0,0	17,0
1	0,3	15,4	1,3	16,2
2	1,0	13,7	2,7	15,3
3	1,9	12,1	4,0	14,5
4	2,8	10,9	5,3	13,6
5	3,9	9,6	6,7	12,8
6	5,1	8,2	8,0	11,9
7	6,3	7,2	9,3	11,1
8	7,6	6,1	10,7	10,2
9	9,0	5,1	12,0	9,4
10	10,6	4,2	13,4	8,5
11	11,8	3,5	14,7	7,7
12	13,6	2,7	16,0	6,8
13	14,9	2,1	17,4	6,0
14	16,9	1,5	18,7	5,1
15	18,3	1,1	20,0	4,3
16	19,9	0,7	21,4	3,4
17	21,4	0,4	22,7	2,6
18	23,5	0,2	24,0	1,7
19	25,1	0,0	25,4	0,8
20	26,7	0,0	26,7	0,0

[36] Tautócrona - Curva de tempos iguais, do grego: (*tauto* → mesmo) + (*chronos* → tempo).

Exp_h10.mdl – Interagindo com o Plano Inclinado

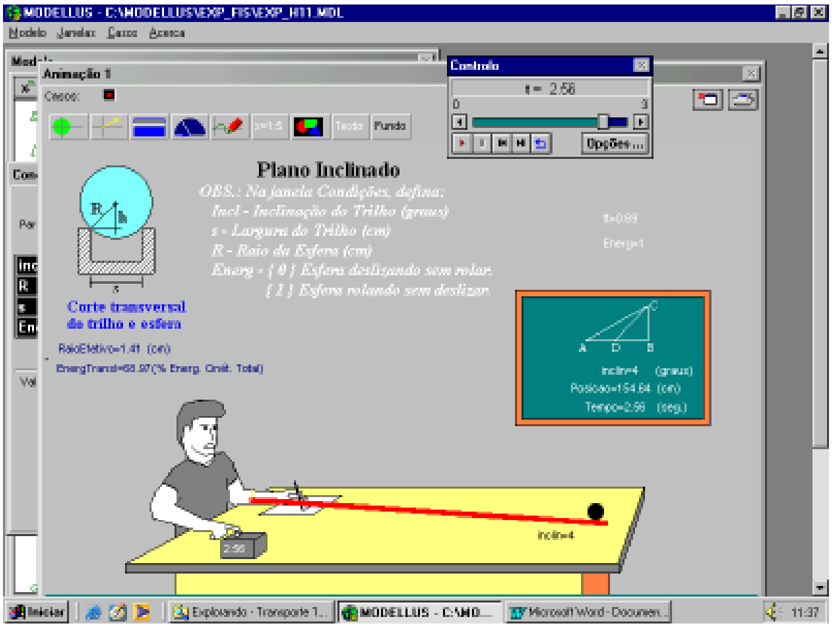


Figura 5.13 – Simulação de um plano inclinado em forma de calha onde o movimento de rolagem da esfera é levado em consideração, no ambiente do aplicativo *Modellus*.

Objetivos: *Explorar tanto quantitativamente como qualitativamente o movimento de uma esfera ao longo de uma calha.*

Uso: *Essa simulação ao contrário das outras até aqui considera a esfera ao rolar sobre o trilho sem escorregar. O usuário deverá relacionar na janela "condições" os parâmetros de inclinação do trilho (Incl); raio da esfera (R); largura do trilho (s) e consideração ou não do rolamento da esfera (Energ).*

Aspectos a explorar: *Emprego de materiais de baixo custo; vantagem da simulação em relação aos experimentos reais no que tange aos "ruídos ao trabalho pedagógico".*

Essa simulação, ao contrário das anteriores que consideravam o corpo como uma partícula que escorregava sobre o trilho sem atrito, leva em consideração o movimento da esfera que rola sobre o trilho sem escorregar (tópico 4.3.4). Acreditamos com isso fornecer uma ferramenta prática para que experimentos de baixo custo usando como plano inclinado um trilho em forma de "U" e como móvel uma esfera de aço possam ser explorados e interpretados tanto quantitativamente como qualitativamente.

A simulação é inspirada em um procedimento experimental muito comum nos laboratórios de ensino. Onde o material usado para confeccionar o plano inclinado é uma canaleta de largura "s" e o móvel é uma esfera de raio "R", onde (2R>s). Os dados de posição e tempo do móvel são relacionados no quadro negro ao fundo.

<u>Sugestões de questões a serem levantadas</u>

Sabendo que o trilho tem um comprimento de 160cm determine o que se pede.

1. Usando o simulador, determine o espaço percorrido no trilho após 1,15 segundos de descida, nas seguintes situações:

   a. (Incli.= 10º; R=1.0cm; s=1.0cm; Energ.=0); (S = ______)

   b. (Incli.= 5º; R=1.0cm; s=1.0cm; Energ. =0); (S = ______)

   c. (Incli.= 5º; R=1.0cm; s=1.0cm; Energ. =1); (S = ______)

   d. (Incli.= 5º; R=0.8cm; s=1.0cm; Energ. =1); (S = ______)

   e. (Incli.= 5º; R=0.8cm; s=0cm; Energ. =1); (S = ______)

2. Usando os dados do exercício anterior, responda:

   a. O espaço percorrido é maior na menor ou na maior inclinação? Por quê?

   b. Atribuindo Energ.=1, percebemos que espaço percorrido irá aumentar ou diminuir? Por quê?

   c. Diminuindo o raio da esfera o espaço percorrido aumentou o diminuiu? Por quê?

   d. Ao considerarmos o trilho sem largura (s=0) espaço percorrido aumentou ou diminuiu em relação a o caso anterior? Por quê?

3. Usando (Incli.= Qualquer uma entre 4º e 20º; R=0.8cm; s=1.0cm; Energ. =1). Determine dez dados de (posição & tempo). Escolha como posição inicial o início do trilho (S_0=0cm) e as demais uniformemente distribuídas ao longo do comprimento do trilho.

S = posição (cm)	**t = tempo (s)**	**a=aceleração (m/s^2)**
S_0 = ***0***	t_0 = ***0***	
S_1 =	t_1 =	a_1 =
S_2 =	t_2 =	a_2 =
S_3 =	t_3 =	a_3 =
S_4 =	t_4 =	a_4 =
S_5 =	t_5 =	a_5 =
S_6 =	t_6 =	a_6 =
S_7 =	t_7 =	a_7 =
S_8 =	t_8 =	a_8 =
S_9 =	t_9 =	a_9 =
S_{10} =	t_{10} =	a_{10} =
		$a_m=\Sigma a_i/n=$

4. Plote os pontos de (S&t) em uma folha de papel milimetrado.

5. Que curva é essa?

6. Os espaços guardam a proporção com os quadrados dos tempos?

7. Complete a coluna 3, calculado a aceleração (a) em cada deslocamento (equação 4.7) e ao final a aceleração média (a_m).

8. Determine a aceleração gravitacional do lugar empregando a equação 4.19.

Obs. 1: Converta as medidas de posição de cm para m para obter a aceleração em m/s^2.

Obs. 2: O índice f_T que mede o percentual de energia cinética de translação em relação à energia total da esfera é função das dimensões do trilho e da esfera (equação 4.17) e é dado pelo simulador.

Questões ao professor

8. Aumentando a largura do trilho, iremos aumentar ou diminuir o raio efetivo da esfera?

9. Usando os dados do exercício 3, calcule:

- **a.** A terceira proporcional para essa situação (considere o comprimento de 1,6m e a altura referente a inclinação que foi arbitrada).
- **b.** O tempo de queda livre para essa altura
- **c.** O espaço percorrido no trilho durante o tempo de queda.
- **d.** As distâncias calculadas em “a” e “c” são iguais? Porquê?
- **e.** Que tipo de parâmetro na janela “Condições” deveria sofrer ajuste a fim de tornar esses tempos iguais?

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Não há ensino sem pesquisa e pesquisa sem ensino
- Paulo Freire -

Acreditamos que o emprego de história da ciência no Ensino de Ciências é de extrema importância para a formação de uma cultura científica, dessa forma, esperamos que esse trabalho dê contribuições para que um profissional de ensino que opte por seguir a linha de ensino baseada no emprego da história e filosofia da ciência tenha como transpor a barreira do emprego exclusivo de fontes textuais e possa assim explorar a dimensão empírica que a experimentação representa como elemento indissociável da ciência. Entendemos ainda que embora a experimentação já seja uma ferramenta largamente estudada e utilizada como instrumento de ensino, a nossa proposta, vem preencher uma lacuna no que diz respeito à utilização de experimentos históricos. Esse esforço é amparado pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), que prevê que o educando deve desenvolver, dentre outras, as competências e habilidades que o permitam:

> Reconhecer o sentido histórico da ciência e da tecnologia, percebendo o seu papel na vida humana em diferentes épocas e na capacidade humana de transformar o meio [...] Compreender as ciências como construções humanas, entendendo como elas se desenvolvem por acumulação, continuidade ou ruptura de paradigmas, relacionando o desenvolvimento científico com a transformação da sociedade. (Brasil, 2002, p.217).

Ao abordar os aspectos epistemológicos e práticos que envolvem a experimentação como uma dimensão da ciência, a resgatamos também como um importante elemento articulador capaz de dar suporte à formação de uma cultura científica. Para tanto, o pensamento de Paulo Freire e de Gaston Bachelard foram importantes referenciais teóricos, respectivamente, no delineamento das dimensões pedagógica e epistemológica. Em relação à pedagogia de Paulo Freire, empregamos os experimentos históricos como elementos de articulação capazes de propiciar o diálogo horizontal que é a base de sua pedagogia dialógica e libertadora. Já em relação à epistemologia histórico crítica de Gaston Bachelard, exploramos as possibilidade que os experimentos encerram de confrontar o senso comum do indivíduo e de levantamento de questões que possam propiciar situações onde a ruptura e quebra de obstáculos se apresentem.

Ao longo do trabalho, buscamos nos afastar de idéia de construção de um "método" de como escolher, pesquisar, reconstituir e implementar um experimento histórico. Entretanto tivemos a preocupação de que a metodologia a aqui empregada pudesse ser aplicada a outros instantes da história da ciência. Para isso, os procedimentos que envolvem a reconstituição de um experimento histórico foram tratados de forma a poderem servir de auxílio para que outros trabalhos possam ser feitos na mesma linha, até mesmo porque os casos escolhidos embora sejam bastante complexos e ricos sob diversos prismas, com certeza não conseguirão abarcar todos os elementos que compões essa dimensão. Sendo assim deixamos como sugestão para outros trabalhos nessa linha a lista de experimentos do apêndice-B. Experimentos que, em diversos momentos, foram trazidos à tona pela importância epistemológica, simplicidade ou contexto histórico a que pertenciam, além da possibilidade de serem explorados através das experiências de pensamento; das experiências reais ou das simulações computacionais. Esperamos então, abrir caminho para que outros conteúdos e outros instantes da história da ciência possam ser contemplados.

Esse material não chegou a ser aplicado em uma ambiente escolar, logo não constam aqui resultados estatísticos que validem ou não o seu emprego. Nos preocupamos em usar o curto período de tempo a que dispúnhamos para dar maior densidade às discussões teóricas que subsidiaram os esforços aqui empreendidos em detrimento de uma aplicação prematura que nos teria privado do amadurecimento teórico e do aprimoramento do material que alcançamos. Entretanto embora sem esse retorno estatístico temos certeza que haverá uma contribuição ao panorama do Ensino de Ciências pelo fato de subsidiar uma linha de ensino que a cada dia ganha mais força que é o emprego da história e da filosofia da ciência.

No que tange à aplicabilidade desse trabalho, fornecemos no apêndice F, sugestões de estratégias para sala de aula baseadas num conjunto de dez simulações de computador que exploram algumas questões físicas que identificamos dentro da perspectiva da história da ciência sem perder o prisma pedagógico e epistemológico que norteou a obra.

Esperamos, sobretudo, que esse trabalho além de resgatar o papel da experimentação como uma importante dimensão da ciência e sem a qual o ensino tornar-se-ia incompleto. Sinalize também como uma alternativa ao emprego apenas de fontes textuais quando do emprego de história de filosofia da ciência no Ensino de Ciências. E nesse caso tendo como alternativa não apenas as reconstituições reais, mas também às experiências de pensamento e as simulações de computador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Maria J. B.; LEITE, Maria S. Compreensão de termos científicos no discurso da ciência. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n.4,p.458-468, dez, 2001.

ARAÚJO, Hugo. **Braquistócrona & Geodésica:** Um problema de cálculo de variações. Disponível em: <http://www.math.ist.utl.pt/talentos/Apresentacoes/06_hugo_araujo.ppt> Acesso em: 16/05/06.

ARAÚJO, Mauro S. T.; ABIB, Maria Lúcia V. S. Atividades experimentais no ensino de Física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n.2,p.176-194, jun, 2003.

ARRIASSECQ, Irene. et al. Cuerpo rígido: experiencia de laboratorio con material de bajo costo. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.16, n.1: p.92-100, abr. 1999.

ATX, Rolando. Para suas aulas de cinemática: o volante, um móvel bem comportado. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.21, n. especial: p.59-63, nov. 2004.

AXT, Rolando. **O papel da experimentação no ensino de ciências**. In: MOREIRA, M. A. & AXT, R., Tópicos em ensino de ciências. Porto Alegre: Sagra, 1991.

AZEVEDO, Sandro. **Tutorial (Modellus 1.11)**. Disponível em: < http://www.mat.ufrgs.br/ ~edumatec/atividades/ativ27/tutorial.html> Acesso em: 18/04/05.

BACHELARD, Gaston. **A formação do espírito científico**. Rio de janeiro: Contraponto, 1996.

BANFI, Antônio. **Galileu**. Lisboa: Edições 70, 1981.

BARBOSA, Joaquim O.; PAULO, Sérgio R.; RINALDI, Carlos. Investigação do papel da experimentação na construção de conceitos em eletricidade no ensino médio. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.16, n.1: p.105-122, abr. 1999.

BARROS, Marcelo A.; CARVALHO, Anna M. P. A história da ciência iluminando o ensino de visão. **Ciência & Educação**, v. 5, n. 1, p.83-94, 1998.

BATISTA, Graciliano da S.; FREIRE, Cleuton; MOREIRA, José E. Experiências com a braquistócrona. **Física na Escola**, v. 7, n. 2, p.58-60, 2006.

BORGES, Tarcísio A. Novos rumos para o laboratório de ciências**. Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.18, n.3: p.291-313, dez. 2002.

BRASIL, Ministério da Educação. **Parâmetros Curriculares Nacionais**: Ensino Médio. Brasília: MEC; SEMTEC, 2002.

CAMILETTI, Giuseppi; FERRACIOLI, Laércio. A utilização da modelagem computacional semiquantitativa no estudo do sistema massa-mola. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n2, p.110-123, jun. 2002.

CARNEIRO, Fernando Lobo (Coord.). **350 anos dos "Discorsi intorno a due nuove scienze" de Galileu Galilei**. Rio de Janeiro; COPPE, Ed. Marco Zero, 1989.

CARVALHO, Flávio. Ciências: o fator acaso. **Superinteressante**. Rio de Janeiro. Ed. Abril. ano 4, n.8, ago. 1990.

CREASE, Robert P. The most beautiful experiment. **Physics World**. Disponível em: < http:// physicsweb.org/articles/world/15/9/2>. Acesso em: 07/08/05

CRUZ, Júnio M. R.; KÖCHE, Nadia M. L.; LOGRADO, Paulo G.(Orgs.). **Física 1 experimental.** Brasília: ____, 2006.

DELIZOICOV, Demétrio. **Metodologia do ensino de ciências**. São Paulo: Cortez, 1994.

DIAS, Penha Maria Cardoso. at al. Gravitação Universal: um texto para o Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n3,p.257-271, 2004.

DUHEM, Pierre. **The aim and structure of physical theory**. Princeton: Princeton University Press, 1906.

FRANCO Jr., Creso. Os livros e a gravidade: uma queda pouco didática. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, Brasília. v.70, n.165, p.224-242, maio/ago. 1989.

FREIRE, Paulo. **Extensão ou comunicação?** Rio de Janeiro: Ed. Paz e Terra, 1971.

FREIRE, Paulo. **Pedagogia da autonomia**: saberes necessários à prática educativa**.** São Paulo: Ed. Paz e Terra, 1996.

FREIRE, Paulo. **Pedagogia do oprimido.** Rio de Janeiro: Ed. Paz e Terra, 1975.

FREUND, John E.; SIMON, Garry A. **Estatística aplicada**: economia, administração e contabilidade. Porto Alegre: Ed. Artes Médicas Sul, 1993.

GALIAZZI, Maria do C. et al. Objetivos das atividades experimentais no ensino médio: pesquisa coletiva como modo de formação de professores de ciências. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 3, p.249-263, 2001.

GALILEI, Galileu. **Diálogos sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano**. São Paulo: Discurso Editorial, 2001.

GALILEI, Galileu. **Duas novas ciências**. 2.ed. São Paulo: Nova Stella, 1988.

GASPAR, Alberto**. Experiências de ciência para o ensino fundamental**. São Paulo: Ática, 2003.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física 1**. Rio de Janeiro: LTC, 1991.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física 2**. Rio de Janeiro: LTC, 1992.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física 3**. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

HODSON, Derek. Experiments in science and science teaching. **Educational Philosophy & Theory**, n.20, p.53-66, 1988.

HODSON, Derek. Hacia um enfoque más crítico del trabajo de laboratório. **Enseñanza de las Ciencias**, v.12, n.3, p.299-313, 1994.

HÖTTECKE, Dietmar. Wow and what can we learn from replicating historical experiments? A case study. **Science & Education**, 9, p.343-362, 2000.

HÜLSENDEGER, Margarete. Uma análise das concepções dos alunos sobre a queda dos corpos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.21, n.3: p.377-391, dez. 2004.

IF/UFPEL. **Experimentos históricos de Física**. Disponível em: <http://www.ufpel.tche.br/ifm/histfis>. Acesso em: 07/05/05.

IF/UFRGS. **Os mais belos experimentos da física**. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/historia/top10.html>. Acesso em: 07/04/06.

IMSS. **Plano inclinado de Galileu**. Disponível em <http://brunelleschi.imss.fi.it>. Acesso em: 25 de nov. de 2005.

KOYRÉ, Alexandre. **Estudos de história do pensamento científico**. Brasília: Editora UnB, 1982.

KUBLI, Fritz. Historical aspects in physics teaching: using Galileo's work in a new swiss project. **Science & Education**, 8, p.137-150, 1999.

KUHN, Thomas S. **A estruturas das revoluções científicas**. São Paulo: Perspectiva, 2003.

KUHN, Thomas S. **A tensão essencial**. Lisboa: Edições 70, 1977.

LANGEVIN, Paul. **O valor educativo da história da ciência**. In: Gama, R..Ciência e técnica. Antologia de textos históricos. Rio de Janeiro: Ciência e Técnica. 1992.

LATTERY, Mark J. Thought experiments in physics education: a simple and pratical example. **Science & Education**, 10, p.485-492, 2001.

LAUDARES, Francisco. et al. Usando sensores magnéticos em um trilho de ar. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n3,p.233-236, 2004.

LAVILLE, Chistian; DIONNE, Jean. **A construção do saber**. Porto Alegre: Editora Artes Médicas Sul.; Belo Horizonte: Editora da UFMG, 1999.

MACH, Ernst. **Popular Scientific Lectures**. Open Court Publishing, 4ª edição, 1910.

MARTINS, André Ferrer P.; ZANETIC, João. O tempo na mecânica: de coadjuvante a protagonista. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.19, n.2: p.149-175, ago. 2002.

MASSARANI, Luisa; TURNEY, Jon; MOREIRA, Ildeu de Castro. **Terra incógnita**: a interface entre ciência e público. Rio de Janeiro: Vieira & Lent, 2005.

MATTHEWS, Michel R. História, Filosofia e Ensino de Ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.12, n.3: p.164-214, dez. 1995.

MEDEIROS, Alexandre; MEDEIROS, Cleide F. Possibilidades e limitações das simulações computacionais no ensino de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n2, p.77-86, jun. 2002.

MICHAELIS, Henriette. **Michaelis**: Dicionário ilustrado inglês-português. São Paulo: Melhoramentos, 1994.

MODELLUS. **Modellus**. Disponível em: <http://phoenix.sce.fct.unl.pt/modellus/>. Acesso em: 07/04/06

MOREIRA, Marco Antônio. **Aprendizagem significativa**. Brasília: Editora da Universidade de Brasília. 1999.

MORETTO, Vasco Pedro. **Física em módulos de ensino**: Mecânica. São Paulo: Editora Ática. 1987.

NASA. **Feather drop**. Disponível em: <http://vesuvius.jsc.nasa.gov/er/she/feather>. Acesso em: 07/04/06

NEVES, Marco César. **De experimentos, paradigmas e diversidades no ensino de física**: construindo alternativas. Maringá: Editora Massoni, 2005.

PIETROCOLA, Maurício (Org.). **Ensino de Física**: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora. Florianópolis: Editora UFSC, 2005.

PIMENTEL, Jorge R. Influência do raio efetivo no movimento de projéteis esféricos lançados horizontalmente. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.22, n.2: p.209-219, ago. 2005.

PLEITZ, V. Quando uma experiência é crucial? **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 21, n.2,p.255-263, jun, 1999.

PSSC, Physical Science Study Committee. **Física**: parte 1. Brasília: Editora UnB, 1963.

REINER, Mirian; BURKO, Lior M. On the Limitations of Thought Experiments in Physics and the Consequences for Physics Education. **Science & Education**, 12, p.365-385, 2003.

REZENDE, Eliane Q.; QUEIROZ, Maria L. **Geometria euclidiana plana e construções geométricas**. Campinas: Editora da UNICAMP; São Paulo: Imprensa Oficial, 2000.

RIVAL, Michel. **Os grandes experimentos científicos**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1997.

ROBERTS, Royston M. **Descobertas acidentais em ciências**. Campinas: Papirus, 1995.

SHAMOS, Morris H. **Great experiments in physics**: firsthand accounts from Galileo to Einstein. New York: Dover Publications, 1987.

SHELDRAKE, Rupert. **Sete experimentos que podem mudar o mundo**. São Paulo: Editora Cultrix, 1995.

SILVA, Lenice H. de A.; ZANNON, Lenir B. **A experimentação no ensino de ciências.** In: SCHNETZLER, R. P.; ARAGÃO, R. M. de (Orgs.). Ensino de ciências: fundamentos e abordagens. Campinas: R Vieira Graf. & Ed. Ltda, 2000.

SILVA, Wilton P. et al. Esfera em plano inclinado: conservação da energia mecânica e força de atrito. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 19, n. especial, p.07-27, jun, 2003.

SILVEIRA, Fernando L.; OSTERMANN, Fernanda. A insustentabilidade da proposta indutivista de “descobrir a lei a partir de resultados experimentais”. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.19, n. especial: p.07-27, jun. 2002.

SILVEIRA, Fernando L.; PEDUZZI, Luiz O. Q. Três episódios de descoberta científica: da caricatura empirista a uma outra história. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.23, n.1: p.27-55, abr. 2006.

SNYDERS, Georges. **A alegria na escola**. São Paulo: Editora Manoele, 1988.

SOBEL, Dava. **A filha de Galileu**: um relato bibliográfico de ciência, fé e amor. São Paulo: Companhia das Letras, 2000.

STINNER, Arthur. et al. The Renewal of Case Studies in Science Education. **Science & Education**, 12, p.617-643, 2003.

TEIXEIRA, Elder S. A ciência galileana: uma ilustre desconhecida. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.16, n.1: p.35-42, abr. 1999.

THUILLIER, Pierre. **De Arquimedes a Einstein**: a face oculta da invenção científica. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1994.

UCS. **Quanto tempo dura 1 minuto** (Departamento de Física e Química**,** Universidade de Caxias do Sul)**.** Disponível em: < http://www.ucs.br/ccet/defq/naeq/material_didatico/textos _interativos_21.htm >. Acesso em: 15/07/05.

VEIT, Eliana A. TEODORO, V.D. Modelagem no ensino / aprendizagem de física e os Novos Parâmetros Curriculares Nacionais para o ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n2, p.87-96, jun. 2002.

WIKIPEDIA. **Thought Experiment**. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki /Thought_experiment>. Acesso em: 12/03/06.

YAMAMOTO, Issao; BARBETA, Vagner B. Simulações de experiências como ferramenta de demonstração em aulas de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n.2,p.215-225, jun, 2001.

ZANETIC, João. **Literatura e cultura científica**, in, ALMEIDA, Maria José P.M; SILVA, Henrique C. (Orgs.). Linguagens, leituras e ensino da ciência. Campinas: Mercado de Letras, 1998.

APÊNDICES

A – Pesos e Medidas Florentinos

Tabela A.1 – Pesos e medidas florentinos

Grandeza	Unidade	
Comprimento	1 ponto	= (0,95 mm)[B]
	1 dedo *(dita)*	≅ (2,4cm)[C]
	1 braça *(braccio)*	≅ (0,583m)[C]
Massa	1 onça *(oncie)*	= 25g
	1 libra *(libbra)*	= (0,3kg)[A]

[A] (Sobel, 2000. p.349)
[B] (Thuillier, 1994. p.133)
[C] (Galileu, 2001, p.665)

B – Alguns Experimentos Históricos na Física

Tabela A.2 – Alguns experimentos históricos da Física

Ano	Experimento
séc.III a.C.	Medida da circunferência da Terra, realizada por **Erastóstenes** [1]
séc.III a.C.	Experiência de **Arquimedes** em hidrostática [1, 2]
1638	Queda de corpos realizada por **Galileu** [1, 2]
1638	Sobre o movimento de corpos num plano inclinado, realizados por **Galileu** [1, 4]
1643	Tubo de mercúrio de **Torricelli** [2]
1647	Do equilíbrio dos liquores de **Blaise Pascal** [2]
1654	Dos hemisférios de Magdeburgo por **Otto von Guericke** [2]
1662	Da elasticidade do ar de **Boyle & Hooke** [2]
1670	Observações de **Römer** na medida da velocidade da luz [1, 2]
1672	Decomposição da luz solar com um prisma, realizada por **Newton** [1, 2]
1742	Trajetória Parabólica de **Gravesande** [2]
1785	Com a balança de torção, realizado por **Coulomb** [2]
1798	Com a balança de torção, realizado por **Cavendish** [1, 2, 4]
1803	De interferência da luz, realizado por **Young** [1, 2, 4]
1820	Descoberta de **Oersted** do eletromagnetismo [1, 2, 3, 4]
1831	**Faraday** e a descoberta da indução eletromagnética [2, 4]
1849	A medida da velocidade da luz com a roda dentada de **Fizeau-Foucault** [2]
1851	Da gota de óleo, realizado por **Millikan** [1, 4]
1851	Pêndulo de **Foucault** [1, 2]
1854	Do equivalente mecânico do calor de **Joule** [1, 2, 4]
1860	De espectroscopia de **Bunsen & Kirchhoff** [2]
1883	Tubo de **Reynolds** na experiência de fluxo [1]
1887	Medida de **Michelson-Morley** do efeito nulo do éter [1, 2]
1895	Do físico **Röntgen** sobre os raios X [1, 3, 4]
1911	Espalhamento de **Rutherford** [1, 2, 4]
1912	**Brag** mostra a difração de raios X em cristais de sal [1, 2]
1919	Medida de **Eddington** da curvatura da luz estelar [1, 2]
1945	Teste de **Trinity** da reação nuclear em cadeia [1]
1961	Da dupla fenda de **Young**, aplicado à interferência de elétrons [1]

[1] Os mais belos experimentos da Física (Crease, 2002)
[2] Os grandes experimentos científicos (Rival, 1997)
[3] Descobertas acidentais em ciências (Roberts, 1995)
[4] Great experiments in physics (Shamos, 1987)

C – Navio de Galileu (*Gendankenexperiment*)

Na obra de Galileu: Diálogos Sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano (1632), o interlocutor Salviati usa uma experiência de pensamento para ilustrar o Princípio da Relatividade Clássica. De acordo com esse princípio não haveria nenhuma observação interna que permita distinguir um movimento em linha reta com velocidade constante de um sistema que esteja em repouso, pois esses dois sistemas sem aceleração são equivalentes.

> Salviati – Fechai-vos com algum amigo no maior compartimento existente sob a coberta de algum grande navio, e fazei que aí existam moscas, borboletas e semelhantes animaizinhos voadores; seja também colocado aí um grande recipiente com água, contendo pequenos peixes; suspenda-se ainda uma balde, que gota a gota verse água em outro recipiente de boca estreita, que esteja colocado por baixo: e, estando em repouso o navio, observai diligentemente como aqueles animaizinhos voadores com igual velocidade vão para todas as partes do ambiente; ver-se-ão os peixes nadar indiferentemente para todos os lados; as gotas cadentes entrarem todas no vaso posto embaixo; e vós, lançando alguma coisa para o amigo, não a deveis lançar com mais força para esta ou aquela parte, quando as distâncias sejam iguais; e saltando, como se diz, com os pés juntos, transporíeis espaços iguais para todas as partes. Assegurai-vos de ter diligentemente todas essas coisas, ainda que não exista dúvida alguma de que enquanto o navio esteja parado as coisas devam acontecer assim, e fazei mover o navio com quanta velocidade desejardes; porque (sempre que o movimento seja uniforme e não flutuante de cá para lá) não reconheceis uma mínima mudança em todos os mencionados efeitos, nem de nenhum deles podereis compreender se o navio andando ou está parado: saltando, percorrereis no tablado os mesmos espaços que antes, nem daríeis saltos maiores para popa ou para a proa, porque o navio se move velossisimamente, ainda que, no tempo durante o qual estejais no ar, o tablado subjacente deslize para a parte contrária ao vosso salto; e jogando alguma coisa ao companheiro, não será necessário atirá-la com mais força para alcança-lo, se ele estiver na proa e vós na popa, que se estivésseis colocados ao contrário; e as gotas continuarão a cair como antes no recipiente inferior, sem que nenhuma caia em direção à popa, ainda que, enquanto a gota está no ar, o navio navegue muitos palmos; os peixes na sua água nadarão sem maior esforço tanto para a parte precedente quanto para a parte subseqüente do vaso, e com a mesma facilidade chegarão ao alimento colocado em qualquer lugar da borda do recipiente; e finalmente as borboletas e as moscas continuarão seus vôos indiferentemente para todas as partes, e nunca acontecerá que se concentrem na parte endereçada à popa, como se estivessem cansadas de acompanhar o curso veloz do navio, do qual seriam separadas, por manterem-se no ar por longo tempo; e se queimando alguma lágrima de incenso produzísseis um pouco de fumaça, veríeis que ela se eleva para o alto e como uma pequena nuvem aí se mantém, movendo-se indiferentemente não mais para esta que para aquela parte. E a razão de toda essa correspondência de efeitos é ser o movimento do navio comum a todas as coisas contidas nele e também no ar, razão pela qual sugeri que se estivesse sob a coberta do navio; porque, se estivesse na coberta do navio e ao ar livre que não segue o curso do navio, ver-se-iam diferenças mais ou menos notáveis em alguns dos efeitos mencionados. (Galileu, 2001,p.268-269).

D – Segmentos e Proporções na Geometria Euclidiana[37]

i. Segmento: Do latim – *segmentu*; é a porção limitada da reta.

ii. Razão: É a expressão que indica o quociente de dois números.

$$\text{Ex: } \frac{a}{b}$$

iii. Proporção Geométrica: É a igualdade de duas razões geométricas.

$$\text{Ex: } \frac{a}{b} = \frac{c}{d} \quad \begin{cases} \text{termos antecedentes: "a" e "c"} \\ \text{termos consequentes: "b" e "d"} \\ \text{meios: "b" e "c"} \\ \text{extremos: "a" e "d"} \end{cases}$$

iv. Terceira Proporcional: É o nome que se dá a cada um dos extremos uma proporção onde os meios são iguais.

$$\text{Ex: } \frac{a}{b} = \frac{b}{x}$$

$$\begin{cases} x = \dfrac{b^2}{a} \quad \therefore \quad \text{"x" é a 3}^{\text{a}}\text{ proporcional entre "a" e "b"} \\ a = \dfrac{b^2}{x} \quad \therefore \quad \text{"a" é a 3}^{\text{a}}\text{ proporcional entre "x" e "b"} \end{cases}$$

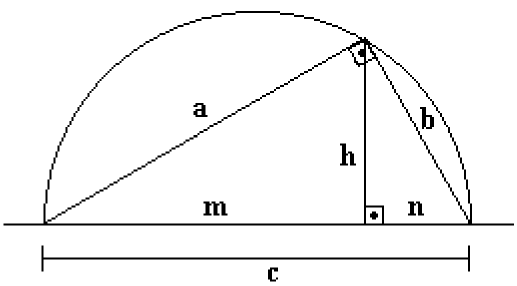
v. Média Proporcional ou Geométrica: Um segmento é a média proporcional a dois outros segmentos, quando ele ocupa os dois meios ou os dois extremos de uma proporção.

$$\text{Ex: } \frac{a}{x} = \frac{x}{b}$$

$$x^2 = a \cdot b$$

$$x = \sqrt{a \cdot b} \quad \therefore \quad \text{"x" é a média proporcional entre "a" e "b"}$$

vi. Aplicações no triângulo retângulo: As relações acima estão presentes também no triângulo retângulo de lados abc, inscrito em uma semicircunferência de raio c/2.



$$\begin{cases} h^2 = m \cdot n \\ a^2 = m \cdot c \\ b^2 = n \cdot c \end{cases}$$

Ex: Usando a última relação, temos:

- "b" é média geométrica de "n" e "c";
- "n" é terceira proporcional de "c" e "b"

[37] Adaptado de (Rezende, 2000).

E – A Trigonometria da Lei das Cordas

Usando elementos da geometria euclidiana no estudo do tempo de descida de móveis sobre o plano inclinado, Galileu chega à chamada Lei das Cordas. A figura ao lado destaca alguns elementos importantes da citação da página 91 sobre a figura 4.18. Com base nesses elementos e empregando a trigonometria e a cinemática, iremos calcular o tempo de descida de um móvel pelas cordas DF e DC (diâmetro “h”). Serão desconsideradas as perdas por atrito de qualquer natureza e a transferência de energia para o rolamento do móvel.

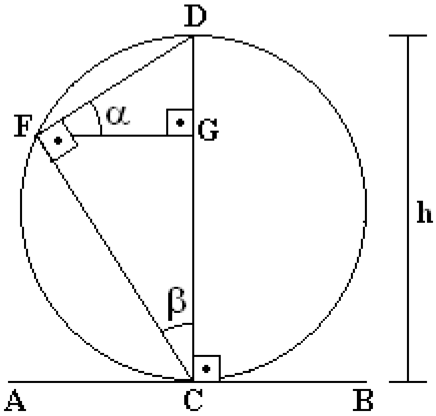


Figura A.1 – Teste da Lei das Cordas

i. Cálculo do tempo de descida pela vertical (corda DC)

$$\text{Segundo a cinemática : } \Delta S = \frac{at^2}{2} \qquad \textbf{(A.1)}$$

$$\text{tomando : } \Delta S = h \text{ e } a = g, \text{teremos :}$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \qquad \textbf{(A.2)}$$

ii. Cálculo do comprimento do plano inclinado (corda DF)

Como o triângulo DFC está inscrito em um semicírculo ele é retângulo (Rezende, 2000). Alem disso ele é semelhante ao triângulo DFG, logo (β=α)

$$\text{sen}\beta = \text{sen}\alpha = \frac{DF}{h}$$

$$DF = h \cdot \text{sen}\alpha \qquad \textbf{(A.3)}$$

iii. Cálculo da aceleração do móvel no plano inclinado (corda DF)

Como consideramos que o móvel desçe o plano sem rolar podemos usar a relação (4.10) que encontramos a apartir da figura 4.12:

$$a = g \cdot \text{sen}\alpha \qquad \textbf{(A.4)}$$

iv. Cálculo do tempo de descida pelo plano inclinado (corda DF)

$$\text{Usando novamente : } \Delta S = \frac{at^2}{2}$$

$$\text{Onde } \begin{cases} \Delta S = DF = h \cdot \text{sen}\alpha & \text{(A.3)} \\ a = g \cdot \text{sen}\alpha & \text{(A.4)} \end{cases}$$

$$\text{teremos : } \quad t = \sqrt{\frac{2h \cdot \text{sen}\alpha}{g \cdot \text{sen}\alpha}}$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \qquad \text{(A.5)}$$

Confirmando a lei de Galileu percebemos que a equação (A.5) é exatamente igual à (A.2) isso atesta que o tempo de descida independe da corda[38]. Nesse caso, o tempo de descida é função apenas do diâmetro do círculo “h” e da aceleração gravitacional “g”.

[38] Qualquer corda que passe por D ou C.

F – Posição de uma partícula em função do tempo ao escorregar por uma curva

Em algumas simulações (exp_h05 e exp_h09) encontramos a necessidade de descrever matematicamente a posição de uma partícula ao descer por uma curva sujeita apenas a sua força peso. Esse é um problema cuja complexidade em muito se distancia da descrição de uma partícula sobre um plano inclinado. A dificuldade está relacionada ao fato de que ao contrário do plano inclinado, a curva y(x) não tem inclinação constante o que faz com que sua aceleração também não seja constante.

$$t(y(x)) = \frac{1}{\sqrt{2g}} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{\frac{1+(y')^2}{y}}\,dx \qquad \textbf{(A.6)}$$

Embora a equação acima, conseguida a partir do Cálculo Variacional (Araújo, 2006 e Batista, 2006), possa resolver o problema de determinação do tempo de descida de uma partícula sobre uma curva y(x) entre x_1 e x_2, usaremos a metodologia sugerida por Galileu (Galileu, 1988,p.236) onde propôs que a união de planos inclinados cujos os pontos extremos pertençam à uma curva "f(x)" forma uma figura que se aproxima dessa mesma curva quando o número de planos tendesse ao infinito. A figura abaixo ilustra esse raciocínio ao mostrar que o arco de círculo de um quadrante se aproxima de um conjunto de cinco planos inclinados.

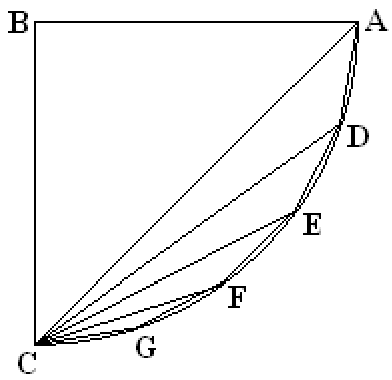


Figura A.2 – Extraído de (Galileu, 1988,p.236)

A fim de exemplificar a metodologia empregada usaremos como f(x) um quadrante de um círculo cujo raio é de 1m, onde seguimos os seguintes passos: Inicialmente o quadrante da circunferência foi ajustado ao plano cartesiano de forma que o início da descida coincidisse com a origem dos eixos (fig. A.3a). Arbitramos então um ponto P de abscissa igual ao ponto de chegada e ordenada igual ao ponto de saída. Esse ponto serviu de referência para ao dividirmos o quadrante por n, determinarmos assim n+1 pontos igualmente espaçados (P_0, P_1,

P_2, P_3, ..., P_{n-1}, P_n) que ligados formam segmentos de reta que se aproximam da curva quando n tende ao infinito (fig. A.3b).

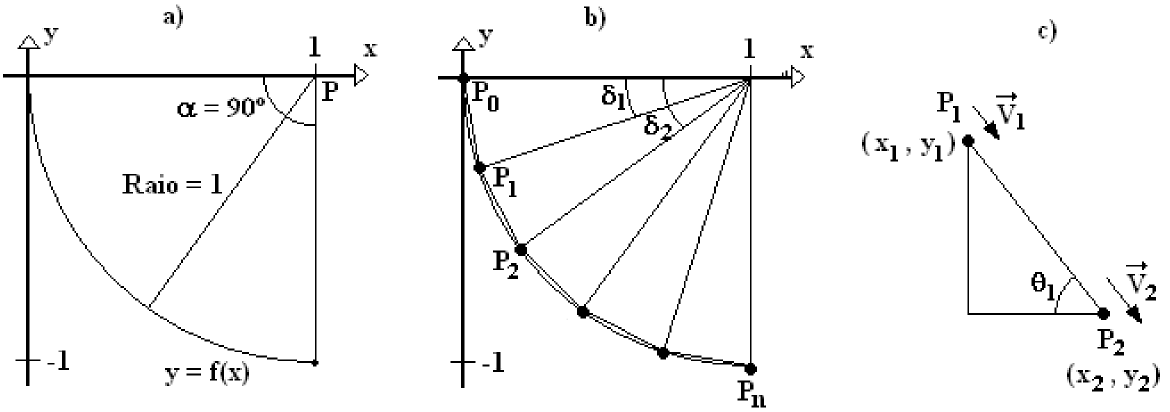


Figura A.3 – a) Quadrante de uma circunferência de raio=1m; b) Determinação de "n" pontos igualmente espaçados e pertencentes à curva ; c) Detalhe do plano inclinado que liga dois pontos consecutivos.

Para isso dividimos o ângulo α (fig. A.3a) em n partes iguais (δ=90º/n) onde (δ_i=i.δ). Nesse caso a posição de cada ponto P_i é dada por:

$$\left.\begin{aligned} x_i &= R\cdot(1-\cos\delta_i) \\ y_i &= -R\cdot \mathrm{sen}\,\delta_i \end{aligned}\right\}\text{para } (i = 0, 1, 2... n) \qquad \textbf{(A.7)}$$

Como cada segmento não passa de um plano inclinado (fig. A.3c) a descrição do movimento de uma partícula sobre o mesmo torna-se simples ao empregarmos a Função Horária da Velocidade (Moretto, 1987,p.113)

$$v = v_0 + at \qquad \textbf{(A.8)}$$

Usando o Teorema da Conservação da Energia podemos determinar a velocidade da partícula através da relação abaixo:

$$v = \sqrt{2g|y_i|} \qquad \textbf{(A.9)}$$

Assim as velocidades em P_1 e P_2 são:

$$v_1 = \sqrt{2g|y_1|} \quad \therefore \quad v_2 = \sqrt{2g|y_2|} \qquad \textbf{(A.10)}$$

A aceleração ao longo da rampa pode ser determinada pela relação (4.10) onde:

$$\theta_1 = \mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \qquad \textbf{(A.11)}$$

Substituindo (A .10), (4.10) e (A.11) em (A.8) poderemos determinar o tempo entre P_1 e P_2:

$$t_2 = \frac{\sqrt{2g|y_2|} - \sqrt{2g|y_1|}}{g \cdot \mathrm{sen}\left(\mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)\right)} = \sqrt{\frac{2}{g}} \cdot \frac{\left(\sqrt{|y_2|} - \sqrt{|y_1|}\right)}{\mathrm{sen}\left(\mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)\right)} \qquad \textbf{(A.12)}$$

Dessa forma:

$$t_i = \sqrt{\frac{2}{g}} \cdot \frac{\left(\sqrt{|y_i|} - \sqrt{|y_{i-1}|}\right)}{\mathrm{sen}\left(\mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}\right)\right)} \qquad \textbf{(A.13)}$$

Como a expressão A.13 determina o tempo entre dois pontos o tempo total do início do movimento até o instante “i” pode ser dado pelo somatório dos instantes transcorridos até então:

$$T_i = \sum_{i=1}^{i} t_i \qquad \textbf{(A.14)}$$

Para determinar o tempo entre o início do movimento e o seu término usamos i=n, assim:

$$T_n = \sum_{i=1}^{n} t_i \qquad \textbf{(A.15)}$$

Uma análise do tempo de descida em função do número de planos (T_n) mostrou, além da confirmação da hipótese de Galileu, um comportamento sem variações significativas para valores de “n” acima de 100 divisões (fig. A.4) dessa forma padronizamos o cálculo para n=100.

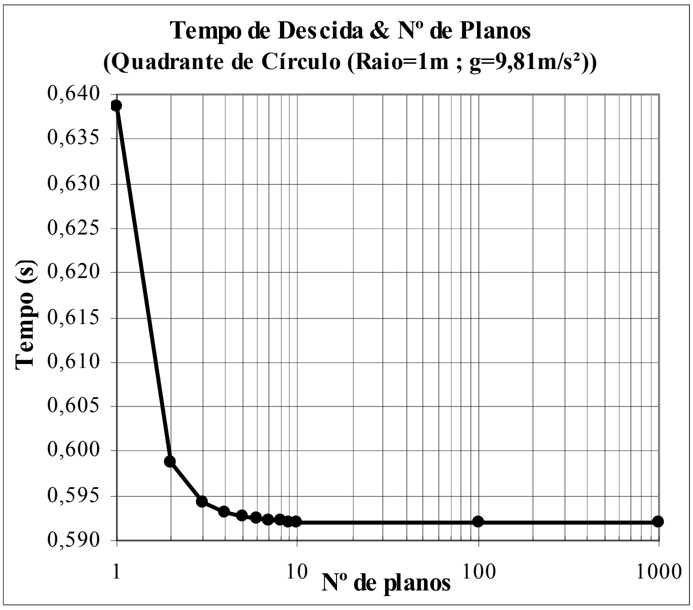


Figura A.4 – Tempo de descida & Nº de Planos [1;1000]

Usando n=100 determinamos dois conjunto de 100 pares ordenados de (x_i,T_i) e (y_i,T_i). Esses conjuntos de pontos foram plotados em dois gráficos (fig. A.5). Aos dois conjuntos de pontos foi aplicada uma ferramenta de Regressão do Microsoft Excel 2000. Empregando para tanto, em ambos os acasos, um ajuste polinomial de 5ª ordem. O qual forneceu um ótimo coeficiente de correlação[39] (R^2=1).

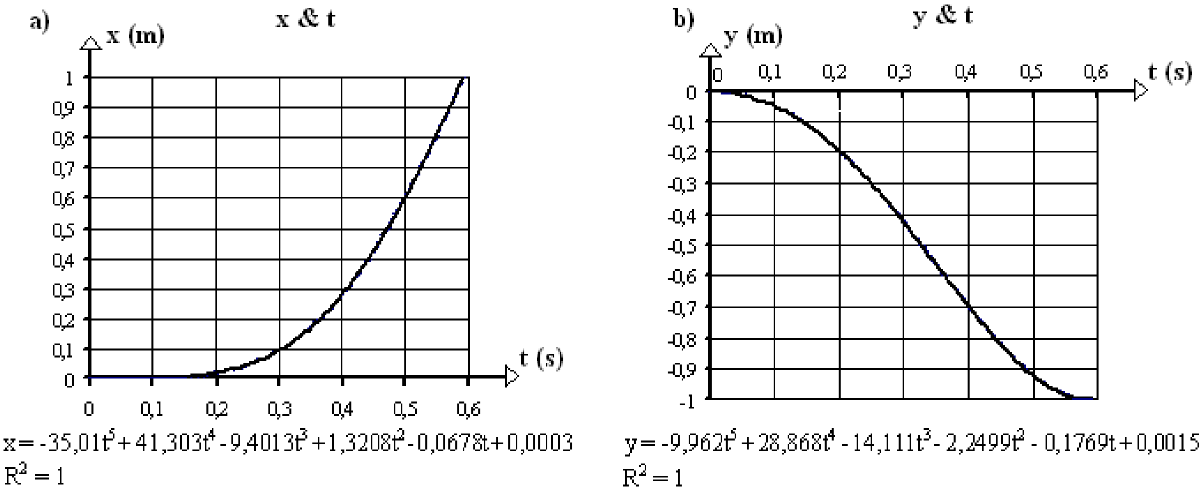


Figura A.5 – Gráfico e função de Regressão dos dados de posição em função do tempo. a)x&t; b) y&t

Para o caso do círculo usamos o seguinte ajuste:

n=100; δ=90º/n; R=1m; T_n=0,591961s

Onde as coordenadas de cada ponto P_i é dada por:

$x_i = R - R.\cos(\delta_i)$

$y_i = -R\ \mathrm{sen}(\delta_i)$

Cujos pontos foram ajustados dentro do intervalo: t[0:0,591961]s, em:

$$x(t) \cong -35{,}01t^5 + 41{,}303t^4 - 9{,}4013t^3 + 1{,}3208t^2 - 0{,}0678t + 0{,}0003 \qquad (R^2=1)$$

$$y(t) \cong -9{,}962t^5 + 28{,}868t^4 - 14{,}111t^3 - 2{,}2499t^2 - 0{,}1769t + 0{,}0015 \qquad (R^2=1)$$

No caso da simulação exp_h05, essas funções foram introduzidas na janela "modelu" do *software Modellus* como uma equação cinemática da posição em função do tempo "f(x;y)" da partícula ao descrever a curva sobre o arco de círculo.

Na simulação exp_h09, a curva é uma ciclóide de altura igual a 1m, mas de forma análoga ao caso do círculo, subdividimos a curva em 100 segmentos de reta e calculamos o

[39] O coeficiente de correlação (R^2) entre duas variáveis é uma medida de grande importância estatística. Ele mede a força de correlação entre essas duas variáveis abrangendo valores que vão de: -1 (relação negativa) a 0 (nenhuma relação) e a +1 (relação positiva).

tempo de descida em cada um deles a fim de conseguir o tempo de descida total. Para isso as seguintes considerações foram tomadas:

$n=100$; $\delta=180°/n$; $a=0{,}5m$; $T_n=0{,}709259s$

Onde as coordenadas de cada ponto P_i é dada por:

$x_i = a(\delta - sen(\delta))$

$y_i = -a(1-\cos(\delta))$

Cujos pontos foram ajustados dentro do intervalo: t[0:0,709259]s, em:

$$x(t) \cong -3E\text{-}07t^5 - 7{,}1459t^4 + 10{,}137t^3 - 0{,}5239t^2 + 0{,}0367t - 0{,}0006 \qquad (R^2=1)$$

$$y(t) \cong -6{,}4455t^5 + 11{,}429t^4 - 0{,}9019t^3 - 4{,}7898t^2 - 0{,}0059t + 6E\text{-}05 \qquad (R^2=1)$$

G – Instalação e uso das simulações em *Modellus* do capítulo 5

A configuração mínima para instalação do ***Modellus 1.11*** (em português):

✓ Processador 486DX2 com 8Mb de RAM e 3Mb de espaço em disco.

Instalação

1. O Software *Modellus* na versão 1.11 pode ser conseguido gratuitamente em (Modellus, 2006). Para isso siga os passos abaixo:

- ✓ Acesse: ***http://phoenix.sce.fct.unl.pt/modellus/***
- ✓ Abra a janela ***Downloads***
- ✓ Localize a versão *Modellus 1.11* (em português), tamanho: 757Kb.
- ✓ Faça o *download* desse arquivo!

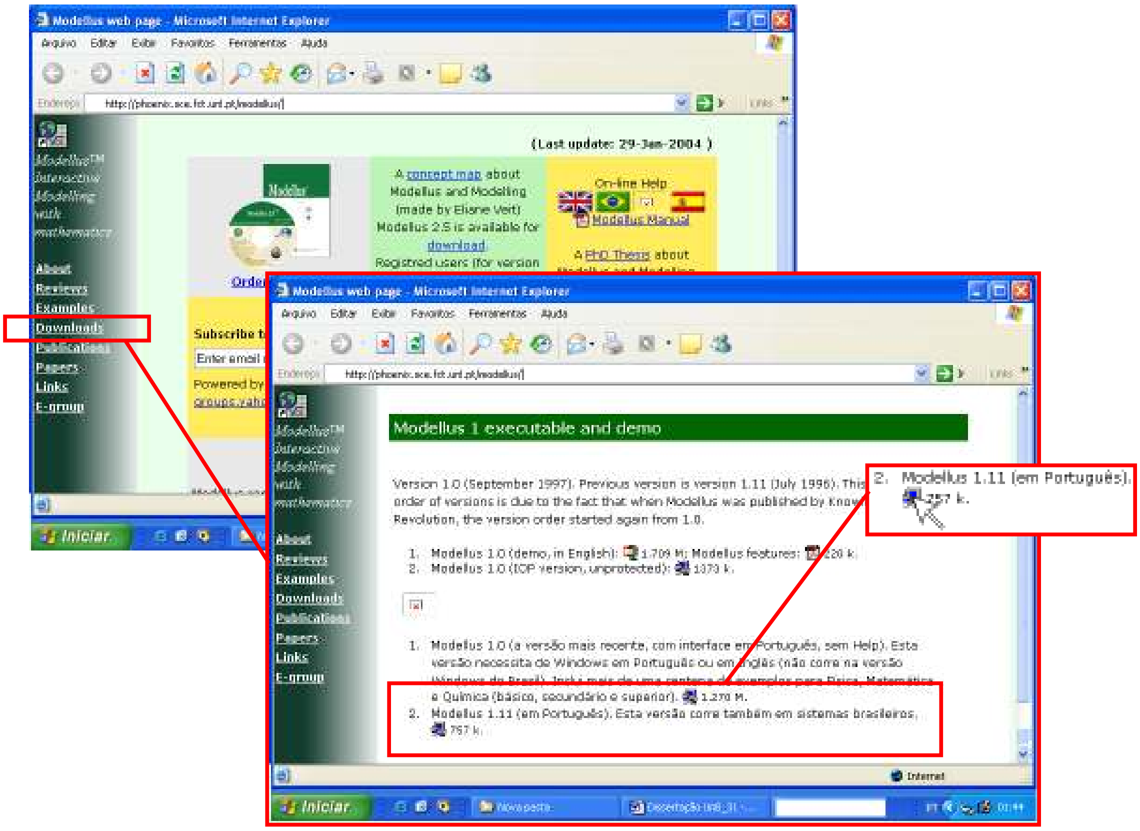


Figura A.6– Procedimentos para instalação do *Modellus 1.11*

2. Ao fazer o *download* do programa, será instalado no seu computador o arquivo **instalar.exe**. Concluído o *download*, selecione esse arquivo para instalar o programa. Quando for solicitado selecionar o diretório de destino, aceite a sugestão do programa. Instale em C:\

3. O instalador irá criar a pasta modellus em C:\ a qual conterá além do aplicativo **Modellus.exe**, alguns exemplos pré-instalados nas pastas: arte; fis_bas; fis_sec; fis_sup; FUNDOS; IMAGENS; mat_bas; mat_sec; mat_sup e química.

4. Para poder utilizar as simulações do capítulo 5 será necessário instalá-las no seu computador, Para isso:

- ✓ Abra no CD que está anexo a este trabalho a pasta "Simulações";
- ✓ Selecione e copie as pastas: exp_fis; FUNDOS e IMAGENS;
- ✓ Cole essas pastas no interior de C:\modellus;
- ✓ Será perguntado se deseja substituir o conteúdo das pastas FUNDOS e IMAGENS. Clique OK.

5. Feche todas as janelas. O programa já pode ser usado.

Uso

1. Abra o programa *Modellus* através de: Iniciar\Programas\Modellus ou C:\modellus\Modellus.exe

2. Uma janela de simulação em branco aparecerá. Para ter acesso às simulações do apêndice F, selecione na barra de menu: Modelo\Ler

3. Uma pequena janela chamada "Ler Modelo" será aberta. Selecione o arquivo c:\modellus\exp_fis e uma lista contendo as simulações do capítulo 5 será aberta. Selecionando uma delas e clicando OK, a simulação correspondente será aberta (fig. A.7).

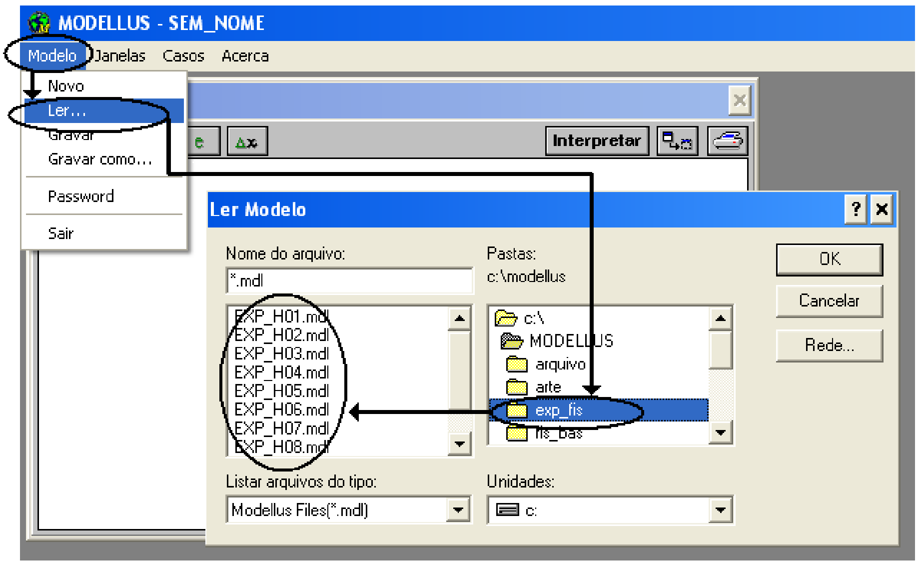


Figura A.7– Procedimentos para abertura das simulações do capítulo 5.

4. Uma vez aberta a simulação serão apresentadas varias janelas. A figura A.8 destaca alguns de seus principais elementos. As simulações[40] ocorrem na janela "Animação 1". Para interagir com essas simulações use os controles da janela "Controlo". Se essa janela não estiver visível clique na barra de título de "Animação 1" ou acesse na barra de menu Janelas\Controlo.

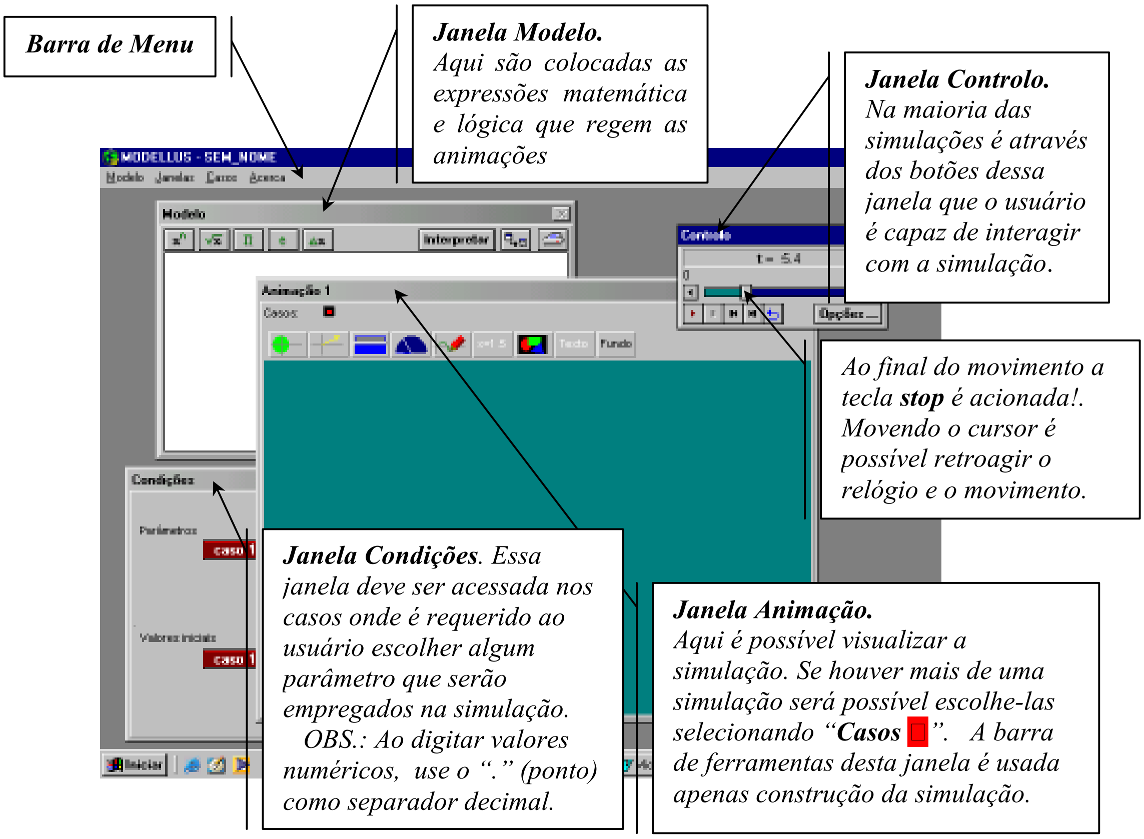


Figura A.8 – Os principais elementos de uma janela do aplicativo *Modellus 1.11*.

5. Embora as simulações no contexto desse trabalho tenham sido desenvolvidas para que usuário se limite a interagir com os modelos já acabados esse aplicativo admite alterações e mesmo a criação de novos modelos. Acreditamos então ser esse software uma alternativa bastante viável no sentido de que outros trabalhos, como exemplificamos no apêndice-B, sejam explorados.

6. Nas simulações: exp_h03.mdl e exp_h10.mdl, será necessário que o usuário determine parâmetros numéricos na janela ***condições***, nesse caso, deve ser usado como separador decimal o "." (ponto), sem unidades físicas.

Exemplo: **12,45cm** (Errado) → **12.45** (Correto)

[40] Para maiores detalhes sobre os recursos do *Modellus 1.11*, acesse o tutorial (Azevedo, 2005).