



GIEF



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto de Física
Licenciatura em Física
Trabalho de Final de Curso

*Um Método para Ensinar
Gravitação Universal*

Mariana Thomé Marques de Souza

Orientadoras: *Penha Maria Cardoso Dias*

Wilma Machado Soares Santos

13/[200-]



AGRADECIMENTOS

Tudo o que conquistei até hoje, devo a meus pais, Selma e Fernando. Sempre se dedicaram à minha formação, procurando me proporcionar o que havia de melhor, sempre superando todas as dificuldades que apareciam pelo caminho. E foi graças ao amor deles que eu estudei no melhor colégio e ingressei na melhor universidade, e sei que, por isso, me tornei uma excelente profissional.

Este trabalho eu dedico, também, a minha irmã, que sempre foi e sempre será a minha metade.

Agradeço também a todos os meus professores, que contribuíram de alguma forma para a minha formação, especialmente às minha orientadoras, Penha e Wilma, por toda a dedicação e carinho.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	4
2 APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	6
2.1 Conceitos Básicos	6
2.2 Conhecimentos Prévios	7
2.3 Questionário	7
2.4 Análise dos Dados	11
2.4.1 Relação entre os Resultados Obtidos e a História da Gravitação	12
3 O PROBLEMA DA QUEDA DOS CORPOS: A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL	13
3.1 <i>Aristóteles</i>	13
3.2 <i>Galileu Galilei</i>	15
3.2.1 O Teorema da Velocidade Média e a Queda dos Corpos	16
3.2.2 O Princípio da Inércia	16
3.2.3 O Movimento da Terra e o Princípio da Inércia	19
3.3 <i>Johannes Kepler</i>	19
3.3.1 Motivações Biográficas	19
3.3.2 Modelos Astronômicos	21
3.4 <i>Isaac Newton</i>	23
3.4.1 A Maçã	23
3.4.2 O Método de Hooke	23
3.4.3 A Terceira Lei	24
4 REFERÊNCIAS	26

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

De acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio, os PCNs, [1]:

Espera-se que o ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais [...]. Para tanto, é essencial que o conhecimento físico seja explicitado como um processo histórico, objeto de contínua transformação [...].

Assim, ao lado de um caráter mais prático, a Física revela também uma dimensão filosófica, com uma beleza e importância que não devem ser subestimadas no processo educativo.

[...] O ensino de Física tem-se realizado freqüentemente mediante a apresentação de conceitos, leis e fórmulas, de forma desarticulada, distanciados do mundo vivido pelos alunos e professores e não só, mas também por isso, vazios de significado. [...]. É preciso rediscutir qual Física ensinar para possibilitar uma melhor compreensão do mundo e uma formação para a cidadania mais adequada.

Não se trata, portanto, de elaborar novas listas de tópicos de conteúdo, mas sobretudo de dar ao ensino de Física novas dimensões. Isso significa promover um conhecimento contextualizado e integrado à vida de cada jovem. [...]. Apresentar uma Física cujo significado o aluno possa perceber no momento em que aprende, e não em um momento posterior ao aprendizado.

Para isso, é imprescindível considerar o mundo vivencial dos alunos, sua realidade próxima ou distante, os objetos e fenômenos com que efetivamente lidam, ou os problemas e indagações que movem sua curiosidade. Esse deve ser o ponto de partida e, de certa forma, também o ponto de chegada.

A Física tem uma maneira própria de lidar com o mundo, que se expressa não só através da forma como representa, descreve e escreve o real, mas sobretudo na busca de regularidades, na conceituação e quantificação das grandezas, na investigação dos fenômenos, no tipo de síntese que promove. [...]

A Física percebida enquanto construção histórica, como atividade social humana, emerge da cultura e leva à compreensão de que modelos explicativos não são únicos nem finais, tendo se sucedido ao longo dos tempos, como o modelo geocêntrico,

substituído pelo heliocêntrico, a teoria do calórico pelo conceito de calor como energia, ou a sucessão dos vários modelos explicativos para a luz. O surgimento de teorias físicas mantém uma relação complexa com o contexto social em que ocorreram. [1, p.22-27]

O ensino de um tópico da Física deve contemplar a interdisciplinaridade, o cotidiano do aluno e deve desenvolver a capacidade do aluno para analisar um fenômeno físico. Por outro lado, a *Teoria da Aprendizagem Significativa*, formulada por David Ausubel [2], parte do pressuposto de que um novo conhecimento a ser adquirido interage com a estrutura cognitiva, previamente existente na mente do aprendiz; nesse processo, os *organizadores prévios* fazem a “ponte” entre o velho e o novo conhecimento.

Este trabalho é um desenvolvimento de [3] e, nele, apresentamos uma proposta para ensinar o tema *Gravitação Universal*, que contemple as recomendações dos PCNs. Além disso, aceitamos a abordagem construtivista da *Teoria da Aprendizagem Significativa* como fundamentadora do processo de aprendizagem. Utilizamos a História da Física como *organizador prévio*. Os fundamentos do método foram propostos em Murilo Magalhães *et alii*. [4]:

A História da Física mostra os problemas, os raciocínios e os experimentos que levaram à formulação de teorias e conceitos; ela revela os ingredientes, lógicos ou empíricos, que realmente foram importantes no processo de criação intelectual; ela clarifica conceitos, revelando-lhes o significado.

Posto isso, o método consiste no seguinte [5]: Um questionário é aplicado em sala de aula antes que um assunto específico seja lecionado. As respostas dadas pelos aprendizes indicam quais conceitos prévios eles têm e como estão sendo utilizados, mesmo se misturados a crenças ou ficção. A História da Física mostra o que é preciso saber para fundamentar um conceito. Uma aula sobre o assunto a ser ensinado é, então, preparada, usando a História da Física seja como *organizador prévio*, seja como facilitadora do aprendizado.

No Capítulo 1 apresentaremos as motivações que nos levaram à elaboração deste trabalho e as diretrizes que nos serviram. No Capítulo 2 discutiremos a *aprendizagem significativa* apresentada por David Ausubel [2], desde seus conceitos básicos à metodologia utilizada para identificar os subsunções a serem trabalhados com os aprendizes. No capítulo 3 apresentaremos os textos sobre História da Física que serão distribuídos entre e trabalhados com os alunos e que servirão como *organizadores prévios* dos conhecimentos que serão adquiridos ou modificados pelo método. Neste capítulo, as seções identificam os físicos que contribuíram para a elaboração da *Lei da Gravitação Universal*. Em seguida, as referências utilizadas.

Capítulo 2

APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

2.1 Conceitos Básicos

Se tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um só princípio, diria o seguinte: “O fator isolado mais importante influenciando a *aprendizagem significativa* é aquilo que o aprendiz já sabe”. Determine isso e ensine-o de acordo [2, p.18]

A expressão “aquilo que o aluno já sabe” refere-se à “estrutura cognitiva” do aprendiz, quanto ao conteúdo total e quanto à organização das idéias. Uma aprendizagem tornar-se-ia “significativa” em um processo que relate uma nova informação com a estrutura do conhecimento específica já existente. Trata-se de um processo de interação, através do qual conceitos relevantes já existentes na mente do aprendiz interagem com o novo material; nessa interação, novos conceitos adquirem significados e podem, também, influenciar conceitos existentes. O *subsunçor* é, justamente, um conceito já existente na estrutura cognitiva, que serve como “âncora” para a nova informação, porque é relevante para o tema que se quer ensinar. *Significados* resultam de uma aprendizagem que seja *significativa*; a existência de *subsunçores* é um dos pré-requisitos para que isso ocorra. A aquisição de significados ocorre de maneira crescente [2, p.19]:

Uma vez que significados iniciais são estabelecidos para signos ou símbolos de conceitos, através do processo de formação de conceitos, novas aprendizagens significativas darão significados adicionais a estes símbolos e novas relações, entre os conceitos anteriormente adquiridos, serão estabelecidas.

O armazenamento de informações na mente do aprendiz é hierarquicamente organizado: Existe uma estrutura de conceitos, na qual um conhecimento mais específico se liga a conceitos mais gerais. Essa organização resulta da interação acima descrita, que caracteriza a *aprendizagem significativa*. Além disso, esses conceitos mais gerais podem ser os *subsunçores*.

Em resumo, uma condição fundamental para a *aprendizagem significativa* é que o material a ser aprendido se relate à estrutura cognitiva do aprendiz de maneira não arbitrária; além disso, na estrutura cognitiva do aprendiz devem estar disponíveis os conceitos *subsunçores* específicos com os quais o novo material se relacionará [2, p.25]:

A essência do processo de *aprendizagem significativa* é que idéias simbolicamente expressas sejam relacionadas de maneira substantiva e não arbitrária ao que o aprendiz já sabe, ou seja, a algum aspecto de sua estrutura cognitiva especificamente relevante que pode ser, por exemplo, uma imagem, um símbolo, um conceito ou uma proposição já significativos.

Ausubel, por outro lado, propõe o uso de *organizadores prévios* que sirvam de “âncora” para o novo conhecimento. *Organizadores prévios* são materiais introdutórios, apresentados antes do próprio material a ser aprendido, porém mais geral que o material. Seu uso é uma estratégia para manipular a estrutura cognitiva a fim de facilitar a *aprendizagem significativa* [2, p.30]:

A principal função do *organizador prévio* é a de servir como “ponte” entre o que o aprendiz já sabe e o que ele precisa saber para que possa aprender significativamente a tarefa com que se depara.

O método deixa alguns problemas. Por exemplo, não ensina como identificar *organizadores prévios*. Também não existe uma receita que produza evidências de que um aprendizado seja *significativo*; a melhor maneira de evitar a sua simulação, segundo Ausubel, é formular questões e problemas de uma maneira **nova**; assim, testes de compreensão devem ser apresentados de maneira diferente do original. Solução de problemas é um método prático de se procurar evidência da *aprendizagem significativa*.

2.2 Conhecimentos Prévios

Uma possibilidade de avaliar os conhecimentos prévios dos alunos é por meio de questionários. Para saber o quê perguntar, inspiramo-nos em situações do cotidiano ou da ficção científica ou do noticiário, que envolvem alguma Física. Além disso, relacionamos essas situações a exemplos e exercícios discutidos nos livros mais utilizados no Ensino Médio, como o de Beatriz Alvarenga [6] e o de Alberto Gaspar [7]. O questionário por nós elaborado consiste em questões discursivas.

2.3 Questionário

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Questionário de Sondagem

Escola:

Turma:

1. Você saberia explicar porque todas as coisas são atraídas para a superfície da Terra?

2. Se o Sol atrai a Terra, a Terra também atrai o Sol? Justifique sua resposta.

3. Por que, se a Terra realiza um movimento de rotação, os corpos e as árvores não saem voando, como um resultado deste tipo de movimento?
-

4. O que você acha que é responsável pela rotação da Lua em torno da Terra? E da Terra em torno do Sol?
-

5. Se massa atrai massa, porque os astronautas se batem no espaço e nós, na Terra, não?
-

6. Por que o astronauta flutua dentro de sua nave quando ela se encontra em órbita?
-

O questionário acima foi aplicado no Colégio de Aplicação da Unigranrio, escola da rede particular de ensino do Estado do Rio de Janeiro. Os 82 alunos que foram submetidos ao questionário eram da terceira série do Ensino Médio, de duas turmas diferentes; mas todos haviam tido aulas sobre idênticos assuntos e se encontravam, ao menos supostamente, no mesmo nível de preparo. Não faremos, pois, separação entre turmas, na análise dos resultados. É importante mencionar que os alunos já tinham tido contato com o tema, na primeira série, em aulas teóricas.

Abaixo, apresentamos as perguntas e respostas dadas pelos alunos antes e depois da aplicação do material didático:

1^a Questão: Você saberia explicar, porque todas as coisas são atraídas para a superfície da Terra?

RESPOSTAS	ALUNOS
Por causa da gravidade	46%
Por causa de uma força gravitacional	41%
Por causa de uma força magnética	8%
Por causa do peso	2%
Não souberam responder	3%

Tabela 2.1: Antes

RESPOSTAS	ALUNOS
Por causa de uma força gravitacional	89%
Por causa da gravidade	6%
Não souberam responder	5%

Tabela 2.2: Depois

2^a Questão: Se o Sol atrai a Terra, a Terra também atrai o Sol? Justifique sua resposta.

RESPOSTAS	ALUNOS
Sim, por causa da força de ação e reação	54%
Sim, por causa da gravidade	3%
Sim, devido à força necessária para não se juntarem	2%
Não souberam responder	41%

Tabela 2.3: Antes

RESPOSTAS	ALUNOS
Sim, por causa da força de ação e reação	96%
Sim, devido à força necessária para não se juntarem	2%
Sim, por causa da gravidade	2%

Tabela 2.4: Depois

3^a Questão: Por que, se a Terra realiza um movimento de rotação, os corpos e as árvores não saem voando, como um resultado desse tipo de movimento?

RESPOSTAS	ALUNOS
Porque estamos presos pela gravidade	41%
Por causa do campo gravitacional terrestre	11%
Por causa da rotação vagarosa da Terra	10%
Porque estamos parados	6%
Não souberam responder	32%

Tabela 2.5: Antes

RESPOSTAS	ALUNOS
Por causa do campo gravitacional terrestre	64%
Por causa da gravidade da Terra	23%
Não souberam responder	13%

Tabela 2.6: Depois

4^a Questão: O que você acha que seja responsável pela rotação da Lua em torno da Terra? E da Terra em torno do Sol?

RESPOSTAS	ALUNOS
A força de ação e de reação entre os corpos	24%
O campo gravitacional entre eles	3%
O campo magnético entre eles	2%
A gravidade	2%
A órbita	2%
Não souberam responder	67%

Tabela 2.7: Antes

RESPOSTAS	ALUNOS
A força de ação e de reação entre os corpos	88%
O campo magnético entre eles	2%
A gravidade	10%

Tabela 2.8: Depois

5^a Questão: Se massa atrai massa, por que os astronautas se batem no espaço e nós, na Terra, não?

RESPOSTAS	ALUNOS
Porque não há gravidade	71%
Porque a gravidade é menor	6%
Por causa da força da gravidade	3%
Não souberam responder	20%

Tabela 2.9: Antes

RESPOSTAS	ALUNOS
Porque não há gravidade	51%
Porque em órbita a gravidade é menor	42%
Não souberam responder	7%

Tabela 2.10: Depois

6^a Questão: Por que o astronauta flutua dentro de sua nave quando ela se encontra em órbita?

RESPOSTAS	ALUNOS
Porque não há gravidade	48%
Por falta de força de gravidade	24%
Porque em órbita a gravidade é menor	11%
Por causa da falta de oxigênio	3%
Porque sua massa diminui	3%
Porque não tem força nele	3%
Não souberam responder	8%

Tabela 2.11: Antes

RESPOSTAS	ALUNOS
Porque não há gravidade	79%
Por falta de força de gravidade	15%
Porque não tem força nele	6%

Tabela 2.12: Depois

Determinamos alguns subsunções neste trabalho, analisando as respostas dadas pelos alunos antes da aplicação do método e os conceitos que deverão ser adquiridos pelos aprendizes. Os subsunções são os conceitos relevantes presentes na estrutura cognitiva dos alunos para os novos conceitos serem adquiridos.

Apresentamos os conceitos relevantes identificados por questão:

Questão 1 — Força gravitacional e gravidade

Questão 2 — Força da ação e reação e força gravitacional

Questão 3 — Campo gravitacional terrestre e gravidade

Questão 4 — Força de ação e reação entre corpos e força gravitacional

Questão 5 — Gravidade diminui com a distância

Questão 6 — Gravidade diminui com a distância

A primeira questão analisa o conceito de atração gravitacional entre corpos. Percebemos que os alunos já tinham o conceito de atração gravitacional, 87%, mas somente 41% dos alunos sabia a resposta correta, e percebemos que não diferenciavam *aceleração da gravidade* e *força gravitacional*, que são conceitos relevantes para o novo aprendizado. Após a aplicação do método, um maior número de alunos, 91%, conseguiu identificar uma atração entre corpos através de uma força, e não de uma aceleração. Este conceito foi muito trabalhado no texto elaborado sobre Isaac Newton, apresentado na seção 3.4.

Na segunda questão, o tema a ser abordado é o mesmo da primeira questão, mas relaciona corpos que não estão na vizinhança imediata da Terra. Alguns alunos, 57%, já tinham o conceito de atração mútua formulado, mas muitos ainda não sabiam responder; confundiam *aceleração com força*, mas 54% sabiam a resposta correta. Após a análise do resultado, percebe-se grande modificação na porcentagem de alunos que relacionaram uma atração entre corpos com a terceira lei de Newton, a lei da ação e reação, 96%. Mas alguns continuavam a insistir na aceleração da gravidade na superfície da Terra. Percebemos que este conceito, para o aluno do Ensino Médio, é o mesmo que força gravitacional, pois “puxam para o centro”, tal conceito foi também trabalhado no texto sobre Isaac Newton, seção 3.4.

Na terceira questão o mesmo tema foi abordado e percebemos que persiste a confusão entre os conceitos de aceleração da gravidade, 41%, e força gravitacional, 11%. Após o método ter sido aplicado, 64% já não fazia esta mistura de conceitos. Este conceito foi estudado no texto sobre Galileu Galilei na seção 3.2, onde discutimos a queda dos corpos.

Na quarta questão percebemos que alguns alunos, 29%, já tinham o conceito de atração entre corpos, mas uma maioria, 71%, tinha o conceito mal formulado ou desconhecia a resposta. Após a aplicação do método, 88% formulou o conceito corretamente, com o auxílio do texto sobre o trabalho de Johannes Kepler, seção 3.3, e sobre Isaac Newton, seção 3.4.

Nas quinta e sexta questões, levanta-se o tema da força a distância e percebe-se que os

aprendizes, 80% na quinta questão e 83% na sexta, tinha o conceito de que quanto mais distante, menor a força de atração, conceito relevante para a Lei da Gravitação Universal. Então eles sabiam que no espaço a “gravidade” deveria ser menor. Mas muitos alunos ainda não sabiam responder. Após o método, a grande maioria, 93% na quinta questão e 94% na sexta, tinha concretizado melhor o conceito, que foi trabalhado no texto sobre Isaac Newton, seção 3.4.

2.4.1 Relação entre os Resultados Obtidos e a História da Gravitação

Na seção sobre a História da Gravitação apresentamos como o conceito de Gravitação foi construído desde a mera observação de corpos na Terra até sua generalização a uma atração universal entre massas.

Os dois primeiros textos, sobre Aristóteles e Galileu Galilei, são parte introdutória para o ensino da Lei da Gravitação Universal. Nesta parte do Histórico, o professor estimula o raciocínio dos alunos mostrando os dois maiores problemas que nos levam à Lei da Gravitação: *Por que os corpos caem?* *Como os corpos caem?* Nestes dois textos o aluno faz o mesmo raciocínio que Aristóteles e Galileu fizeram.

Nos textos seguintes, sobre Johannes Kepler e Isaac Newton, o aluno é apresentado às leis do movimento dos planetas em torno do Sol e à formulação final da Lei da Gravitação Universal, de Newton.

Capítulo 3

O PROBLEMA DA QUEDA DOS CORPOS: A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

3.1 Aristóteles

Aristóteles nasceu em 384 a.C., em Estagira, na Calcídia, localizada na costa setentrional do mar Egeu.

Pensadores helênicos que o precederam tentaram explicar a Natureza. O problema era buscar “o porquê” das transformações ou “movimentos”, que são observados; entre essas transformações, está o chamado “movimento local” ou deslocamento.

Na tradição por ele herdada, há quatro elementos básicos — terra, água, ar e fogo; a cada um estão associadas qualidades primárias fundamentais, formando pares antitéticos: quente e frio, úmido e seco.

Em uma corrente filosófica mais antiga, o mundo seria explicado por um elemento básico e suas qualidades. Aristóteles aderiu a uma corrente filosófica posterior: As propriedades de um corpo seriam parte de sua “essência” ou “forma”. A cada um dos elementos acima mencionados corresponderia um *lugar natural* e um *movimento natural*: Aos corpos *pesados*, o centro do universo; à água, ao ar e ao fogo, respectivamente, esferas concêntricas com a Terra, com raios crescentes nessa ordem. Um corpo só poderia se mover, quando se encontrasse fora de seu lugar natural; portanto, a corpos *pesados* corresponderia um movimento natural em *linha reta para baixo*, em direção ao centro do universo; os corpos *leves*, por exemplo, o fogo, movimentar-se-iam em *linha reta para cima*, em direção à sua esfera; a água, quando na Terra, movimenta-se para *cima* e, quando no ar, para *baixo*; o ar, quando na Terra ou na água, movimenta-se para *cima*, mas, quando no fogo, para *baixo*. Quando se encontram em seu lugar natural, os corpos não se movem.

Os corpos celestes foram tratados diferentemente. A eles foi atribuído um movimento circular uniforme. Isso tem bases observacionais: Os astros nascem a leste e se põem a oeste, parecendo percorrer um arco de círculo no céu. Porém, dentro do esquema conceitual, é preciso postular um novo tipo de matéria à qual corresponderia um movimento circular uniforme — o éter. O éter tinha as características de eternidade, incorruptibilidade, imutabilidade.

Isso pode ser entendido de vários modos. É suficiente pensar que o movimento circular possui uma simetria: Uma esfera é sempre igual a ela mesma, quando é girada em torno de seu eixo. Os gregos associaram à “imutabilidade” a idéia de “perfeição”: Aos objetos celestes perfeitos corresponde o movimento perfeito. Além disso, os astros já se encontram em seu lugar natural e, como, então, não haveria necessidade de movimento, a solução foi entender que os astros se movem “por amor à perfeição”.

O universo foi, correspondentemente, dividido em sublunar e supra-lunar: Aquele é corruptível, mutável e imperfeito; esse, incorruptível, imutável e perfeito.

O universo de Aristóteles não apresenta espaço vazio, pois o vácuo não existe. A razão para isso é que era difícil para os gregos entender o “nada”, pois o que pode existir é a matéria e o vácuo, é, de certo modo, uma espécie de “nada”.

Aristóteles entendeu que corpos mais pesados caem mais rapidamente que corpos mais leves. Ele nunca escreveu uma fórmula, nem poderia, pois o mundo sublunar não era matematizado, somente o movimento dos astros. Entretanto, historiadores expressaram a idéia de Aristóteles assim:

$$v = \frac{W}{R},$$

onde v é a velocidade de queda; W é o “peso” (ele não tinha o conceito de peso, no sentido de força, como hoje, mas pensava que a tendência para cair para o lugar natural era diferente entre os corpos “mais ou menos pesados”); finalmente, R , a resistência (esse conceito é vago e indica tanto a resistência do ar, que dependeria da densidade do meio, quanto atrito em geral ou a inércia dos corpos). Uma consequência interessante segue-se dessa lei: Como a resistência do espaço vazio é zero, a velocidade de qualquer corpo no vácuo seria infinita e um corpo caíria instantaneamente, em contradição com o fato de que corpos mais pesados caem mais rapidamente. A fórmula parece levar a um absurdo, a menos que se negue a existência do vácuo, em cujo caso, o raciocínio não se aplicaria.

Uma outra questão complicada para Aristóteles foi o caráter não-inercial de sua descrição do movimento: Um corpo que se move é empurrado ou puxado por “algo”; esse “algo” estaria sempre em contato com o corpo (não existiria ação a distância), mas não é parte da natureza do corpo. O problema é, então, identificar esse “algo”. Não poderia ser o que hoje chamamos de força de gravidade, pois isso envolveria ação a distância; também não poderia ser atração ao lugar natural do corpo, pela mesma razão. Aristóteles atribuiu ao meio — o ar — a capacidade de empurrar o corpo; o movimento não natural ou *violento* é explicado assim: No caso de uma pedra atirada verticalmente para cima, o movimento seria proveniente de quem a atirou; esse movimento seria transmitido à camada de ar subjacente, que, então, empurraria a pedra e transmitiria movimento à camada seguinte e, assim, sucessivamente [8, p.530]:

Coisas que são atiradas movem-se, apesar de aquilo que lhes deu impulso não estar em contato com elas. Também, pela razão da substituição mútua, ou porque o ar que foi empurrado empurra o objeto com um movimento mais rápido que o movimento natural do projétil.

É claro que, no vácuo, se ele existisse, não poderia haver movimento. É importante mencionar outro argumento de Aristóteles contra o vácuo: Se o vácuo existisse, o movimento

nele teria características do que chamamos de movimento inercial, o que para Aristóteles era um absurdo [8, p.536].

3.2 Galileu Galilei

Uma modificação profunda do entendimento do movimento foi feita no século XIV, em Oxford. Inicialmente, William of Ockham definiu o movimento com conceitos bem diferentes dos aristotélicos. Ele enuncia um princípio epistemológico, que ficou conhecido como *Navalha de Ockham* [8, p.537]:

Movimento não é uma coisa inteiramente distinta, por ela mesma, do corpo permanente, porque é fútil usar mais entidades quando for possível usar menos ... sem uma tal coisa adicional, nós podemos salvar o movimento, e qualquer coisa que é dita sobre o movimento torna-se claro, considerando as partes separadas do movimento.

Com isso, ele eliminou conceitos como “lugar natural” e o movimento passa a ser o mero deslocamento do corpo [8, p.537]:

Pois é claro que movimento local é para ser concebido como se segue: Afirmado que o corpo está em um lugar, depois em outro lugar, assim procedendo sem qualquer repouso ou qualquer coisa intermediária, além do próprio corpo, nós temos movimento local, verdadeiramente.

As afirmações de Ockham influenciaram seus colegas em Oxford. Um grupo de pensadores, reunidos no Colégio de Merton, inventaram o que se chama, hoje, *Cinemática*. Suas contribuições foram [8, p.538]:

1. Uma clara distinção entre **descrição** do movimento e **causa** do movimento. Falava-se em movimento quanto às causas e movimento quanto aos efeitos.
2. Um novo tratamento dado à velocidade, conceituando a *velocidade instantânea*.
3. A definição de *aceleração* e a consideração de *movimentos uniformemente acelerados*.
4. A formulação e demonstração do *Teorema da Velocidade Média*.

O problema colocado pelos mertonianos foi o de como **qualidades** podem ser somadas ou subtraídas: Por exemplo, Santa Clara e Madre Tereza de Calcutá, juntas, formariam uma bondade maior? Para tratar esse problema, os Mertonianos atribuíram a uma qualidade uma *intensidade* e uma *extensão*: A *intensidade* é medida por *graus*; o problema de ver como uma qualidade varia consiste, agora, em ver como o *grau* de sua *intensidade* varia ao longo de uma linha arbitrária e imaginária, chamada *extensão*. Uma felicidade na História da Física foi terem concebido o movimento como uma qualidade: O *grau* é a *velocidade instantânea* e a *extensão*, o *tempo*. Sabe-se que, durante muitos anos, Galileu usou a *distância* ao invés do *tempo* [8, p.540].

Galileu usou as idéias mertonianas de maneira original. Ele deu ao *Teorema da Velocidade Média* uma aplicação que jamais seria concebida no século XIV: Ele o usou para resolver o problema da queda dos corpos.

3.2.1 O Teorema da Velocidade Média e a Queda dos Corpos

O teorema diz que a distância percorrida no movimento uniformemente acelerado é igual à área do retângulo que seria descrito no movimento uniforme, com a velocidade média [9].

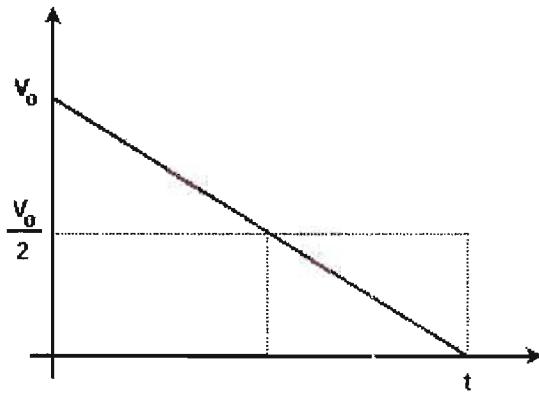


Figura 3.1: O Teorema da Velocidade Média

Se qualquer corpo desce, a partir do repouso, com um movimento uniformemente acelerado, os espaços percorridos, em qualquer tempo, daquele corpo, estão relacionados na razão dupla desses mesmos tempos, isto é, com o quadrado desses tempos.

Galileu usou esse teorema para provar que, se um corpo se move com movimento uniformemente acelerado, a distância, s , percorrida em um tempo t é (em notação moderna)

$$s = \frac{1}{2}gt^2.$$

3.2.2 O Princípio da Inércia

Galileu formulou o *Princípio da Inércia* no contexto de uma discussão sobre a origem da queda dos corpos, em seu livro *Diálogo sobre os Dois Sistemas do Mundo: O Ptolemaico e o Copernicano* [8]. Nesse livro, as discussões acontecem entre três personagens: Um, que representa Galileu (Salviati); outro, que representa o pensamento comum arraigado (Simplício); o último, o leigo inteligente (Sagredo) que, é claro, vai ser convencido por Salviati. Parte do diálogo é o seguinte [10, p.144-148]:

Salviati: [...] Agora me diga: Suponha que você tenha uma superfície plana, lisa, feita de um material como o aço. Ela não está paralela com o solo, e em cima dela você colocou uma bola perfeitamente esférica e feita de um material pesado como o bronze. O que você acredita que irá acontecer quando a bola for solta? Você não acredita, como eu, que ela permanecerá parada?

Simplício: A superfície está inclinada?

Salviati: Sim, isso é o que foi assumido.

Simplício: Não acredito que ela permanecerá parada, pelo contrário, tenho certeza de que ela irá espontaneamente rolar para baixo.

[...]

Salviati: [...]. Durante quanto tempo você acha que a bola permanecerá rolando e com qual velocidade? Lembre-se de que eu disse que era uma bola perfeitamente esférica e uma superfície altamente polida, de modo a remover todos os impedimentos accidentais e externos. Da mesma forma, eu quero que você despreze também qualquer impedimento do ar, causado por sua resistência à separação, e todos os outros obstáculos accidentais, se existir algum.

Simplício: Eu o comprehendi inteiramente, e lhe respondo que a bola continuaria a se mover indefinidamente, tão longe quanto a inclinação da superfície se extendesse e com um movimento continuamente acelerado. Pois tal é a natureza dos corpos pesados [...]; e quanto maior a rampa, maior seria sua velocidade.

Salviati: E se alguém quisesse que a bola se movesse para cima, nessa mesma superfície, você acha que a bola iria?

Simplício: Não espontaneamente, não; mas arrastada ou atirada forçadamente, ela iria.

Salviati: E se a bola fosse arremessada com um impetus forçadamente impresso nela, qual seria seu movimento e quão rápido [seria ele]?

Simplício: O movimento iria constantemente diminuir e seria retardado, sendo contrário a natureza, e teria uma duração maior ou menor, de acordo com um maior ou menor impulso e menor ou maior acente.

Salviati: Muito bem; até aqui você me explicou o movimento em dois planos diferentes. Em um declive, o corpo pesado desce espontaneamente e continua acelerando e mantê-lo em repouso requer uma força. No acente, uma força é necessária para arremessá-lo e até para mantê-lo parado e o movimento impresso diminui continuamente até ser inteiramente aniquilado. Você diz, também, que uma diferença nos dois casos se origina na maior ou menor declive do plano, de modo que uma velocidade maior se segue de um declive maior, enquanto que, ao contrário, em um acente, um dado corpo que se move arremessado com uma força dada move-se mais rapidamente em um acente menor.

Agora, diga-me o que aconteceria, se o mesmo corpo que se move fosse colocado numa superfície sem acente ou declive (plana).

Simplício: [...]. Não havendo declive, não haveria tendéncia natural ao movimento; não havendo acente, não haveria resisténcia a ser movido. Assim, haveria uma indiferença quanto a propensão e a resisténcia ao movimento. Parece-me que a bola deveria permanecer naturalmente estável. [...].

Salviati: [...]. Acho que isso é o que aconteceria, se a bola fosse colocada firmemente. Mas o que aconteceria, se fosse dado à esfera um impulso, em qualquer direção?

Simplício: Deve ser concluído que ela moveria naquela direção.

Salviati: Mas com que tipo de movimento? Um continuamente acelerado, como no declive, ou um continuamente retardado, como no aclive?

Simplício: Não havendo aclive ou declive, não posso ver uma causa para desaceleração ou aceleração.

Salviati: Exatamente assim, Mas, se não existe causa para a retardação da bola, deve haver ainda menos (causa) para que venha ao repouso; assim, até onde você suporia que a bola se movesse?

Simplício: Tão longe quanto a extensão da superfície continuasse sem se levantar ou abaixar.

Salviati: Então, se tal espaço fosse ilimitado, o movimento nele seria, da mesma forma, ilimitado? isto é, perpétuo?

Simplício: Assim parece-me [...].

Tendo feito a opinião comum concordar com a existência de um movimento (que chamamos de) inercial, Galileu pergunta a causa do comportamento de corpos em uma superfície inclinada [10, p.148]:

Salviati: Agora, diga-me, o que você considera ser a causa da bola se mover espontaneamente, quando em declive, e somente forçadamente, quando em aclive?

Simplício: Que a tendência dos corpos pesados é de se mover para o centro da Terra e de se mover para cima, a partir de sua circunferência, somente (forçadamente), enquanto que aquela em aclive se afasta para longe (do centro da Terra).

Nessa passagem, Galileu atém-se a suas origens aristotélicas: Ele sabe que corpos sobre a superfície da Terra têm essa tendência de comportamento. Mas Galileu foi suficientemente inteligente para dizer que gravidade é o nome de algo, cuja natureza não se conhece [8, p.234].

Posto isso, Galileu apresenta um exemplo do que seria a superfície inercial. Existe uma ironia na situação, pois o exemplo é o de uma superfície, na qual um movimento inercial seria impossível, pois é uma superfície curva; no entanto, erros de grandes homens são grandes erros [10, p.147]:

Salviati: Então para que uma superfície não esteja nem em aclive e nem em declive, todas as suas partes devem ser igualmente distantes do centro. Existe tal superfície no mundo?

Simplício: Muitas delas; tal seria a superfície de nosso globo terrestre, se ele fosse liso e não ondulado e montanhoso como é. [...]. [...]

O erro de Galileu parece ter origem na limitação do sistema físico que considera e do aparato conceitual de que dispõe: A origem da Gravitação é a maior ou menor proximidade do centro da Terra, como explicitado no diálogo; nesse contexto, sua conclusão é inevitável, pois, de fato, uma superfície que não se aproxime e nem se afaste do centro só pode ser uma esfera, no caso, a Terra. Acontece que, para se andar sobre uma esfera, por exemplo, ao longo, de um grande círculo, a pessoa faz curvas, o que exige uma aceleração centrípeta e o movimento nessa superfície não seria inercial.

3.2.3 O Movimento da Terra e o Princípio da Inércia

O *Princípio da Inércia* é utilizado para justificar a possibilidade da Terra estar em movimento.

O argumento pré Galileu é o do tiro de canhão para leste e para oeste. Se a Terra se move de oeste para leste, o alcance do tiro para oeste é maior do que o alcance do tiro para o leste: De fato, diz o argumento, enquanto a Terra move para leste, a bala move para oeste, de modo que o alcance seria o que a Terra moveu **acrescido** do que a bala moveu; no caso do tiro para leste, seria o que a Terra moveu **diminuído** do que a bala moveu. Se a Terra está em repouso, os alcances são iguais. Como o observado é a igualdade dos alcances, conclui-se que a Terra é imóvel.

A resposta de Galileu é que o movimento comum à Terra e tudo que nela se encontra não desaparece (pelo *Princípio da Inércia*); assim, a bala de canhão durante seu vôo possui a velocidade que compartilha com a Terra, o canhão e **qualquer pessoa ou coisa** sobre a Terra. O resultado é que o observado por uma pessoa sobre a Terra é o movimento que a bala tem e que a Terra não tem, isto é, o movimento da bala relativo à Terra.

3.3 Johannes Kepler

3.3.1 Motivações Biográficas

Johannes Kepler nasceu em 1571. Aos treze anos, freqüentou um seminário teológico, onde estudou clássicos gregos, a matemática e a música. Aos dezessete anos, transferiu-se para a Universidade Luterana de Tübingen. Continuando sua formação de sacerdote, matriculou-se na Faculdade Teológica. Era conceituado por alguns de seus professores, dentre eles, Michael Mästlin, um astrônomo, que criticou a concepção aristotélica do Cosmo, ao mostrar que o grande cometa de 1577 estava além da esfera lunar. Muito provavelmente por influência de Mästlin, Kepler tornou-se um defensor das idéias de Copérnico. Em 1594, Kepler foi recomendado por seus professores para substituir o professor de matemática e astronomia da escola luterana de Graz, na Estíria. As obrigações de seu cargo incluiam o ensino e, também, o encargo de “matemático oficial” da Estíria. Kepler foi, também, astrólogo.

Kepler acreditava em alguma causa física por trás dos fenômenos naturais, sejam eles ligados à Astrologia ou à Astronomia. Ele imagina que uma “anima motrix” ou, posteriormente, “vis motrix”, emanada do Sol seria responsável pelo movimento dos planetas.

A grande idéia que iria transformar a vida de Kepler surgiu durante uma de suas aulas. O interesse de Kepler no sistema copernicano era motivado por sua atração mística pela idéia do Sol como centro do universo. Qualquer outro arranjo lhe parecia absurdo. Mesmo que o modelo heliocêntrico lhe fosse atraente, algumas questões permaneciam: Por que cinco e não cinqüenta ou dez planetas? Existiria alguma simetria secreta no universo, capaz de explicar tal número? Qual o mecanismo para explicá-lo? Seus esforços iniciais não lhe renderam frutos, mas durante uma aula sobre as conjunções astrológicas de Júpiter e Saturno, a solução explodiu em sua mente.

Kepler sabia que existiam apenas cinco “sólidos platônicos”, os únicos sólidos regulares que podem ser construídos em três dimensões. Eles são descritos como sólidos “perfeitos”,

porque suas faces são idênticas: O tetraedro, o cubo, o octaedro, o dodecaedro e o icosaedro. Kepler imaginou que, usando os sólidos platônicos, ele poderia explicar não só as distâncias relativas entre os planetas mas também o número de planetas no sistema solar. Sua idéia era arranjá-los concentricamente. Desta maneira, Kepler construiu um modelo geométrico do Universo no qual cada esfera representava uma órbita planetária, enquanto entre cada duas esferas residia um sólido platônico. As distâncias entre os planetas era automaticamente fixada pelo modo com que os sólidos se encaixavam dentro das esferas. E, como só existiam cinco sólidos perfeitos, o sistema de Kepler só poderia acomodar seis esferas, explicando o número de planetas no sistema solar. No centro do arranjo, o Sol.

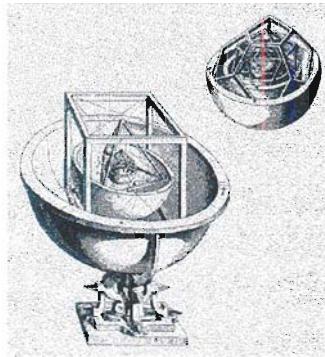


Figura 3.2: O Sistema de Kepler

Em 1596, Kepler publicou sua primeira grande obra, *Mysterium Cosmographicum*. Essa foi a primeira defesa aberta do sistema copernicano. Mais tarde, ele iria descobrir as leis matemáticas que governam os movimentos planetários, que funcionam de modo igual para os planetas que Kepler não sabia existirem.

Embora errada e fisicamente insustentável, essa visão geométrica do cosmo dominou seu pensamento pelo resto de sua vida. À inspiração vinda dos gregos ele adicionou dois ingredientes: Primeiro que as teorias devem acomodar dados experimentais; segundo, que as teorias descrevendo fenômenos naturais devem ser físicas, isto é, devem revelar as causas por trás do comportamento observado.

Em fevereiro de 1600, Kepler chega a Praga para trabalhar como assistente de Tycho Brahe, o maior astrônomo da época. Em contraste com Copérnico e Kepler, que foram levados à astronomia por razões mais filosóficas e místicas, Tycho era um verdadeiro astrônomo observational. Tycho tinha uma habilidade para construir instrumentos e para observar o céu. Sua grande contribuição foi o desenvolvimento de instrumentos que permitissem obter dados mais precisos e, consequentemente, leituras mais acuradas. Ele não aceitou o sistema copernicano por razões técnicas: Esse sistema predizia a chamada *paralaxe dos astros*, que não foi por ele observada.

Tycho propôs, então, seu próprio modelo do cosmo: A Terra estaria no centro, com o Sol em movimento circular a sua volta, como no modelo de Aristóteles; mas, como inovação, ele colocou todos os planetas orbitando em torno do Sol, criando um modelo assimétrico do cosmo.

Tycho obteve dados precisos da órbita de Marte. O movimento de Marte era um problema difícil; hoje sabemos que a órbita de Marte é acentuadamente elíptica, o que não é tão aparente com os outros planetas; assim Marte afastava-se muito do comportamento que se supunha, na época. Kepler usou os dados de Tycho para resolver o problema de determinar a órbita de Marte. Foram cinco anos de trabalho, antes que ele pudesse desvendar o mistério. Mas, depois disso, a astronomia e a filosofia natural nunca seriam as mesmas. Seu cálculo do movimento de Marte foi publicado no livro *Astronomia Nova*, de 1609. O cálculo é trabalhoso, envolve tentativas e hipóteses geniais que permitiriam justificar os resultados.

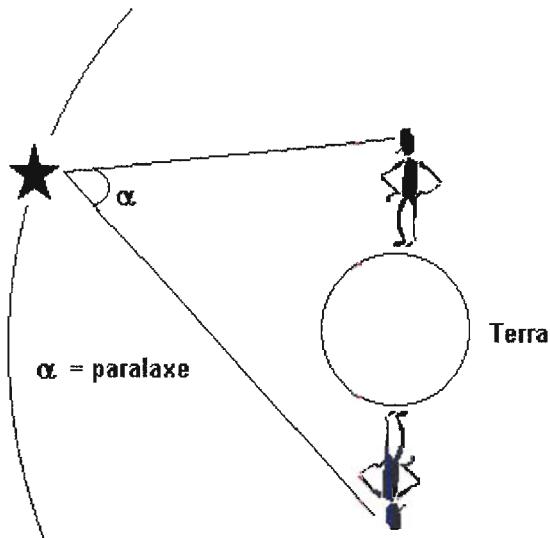


Figura 3.3: A Paralaxe dos Astros: As estrelas estão tão afastadas que α é muito pequeno para ser observado a olho nu. Apenas no final do século XIX telescópios potentes observaram a paralaxe.

3.3.2 Modelos Astronômicos

No sistema de Ptolomeu, os astros se moveriam uniformemente em círculos ao redor da Terra. Porém, as observações mostram desvios desse movimento, chamados, na Antigüidade de *anomalias*:

1. Os planetas de tempos em tempos parecem andar para trás, em seu movimento nos céus (*retrogressão*).
2. Os planetas parecem acelerar em sua jornada pelo céu. Um modo de obter esse resultado, sem introduzir aceleração real, é tornar diferentes as distâncias percorridas no mesmo tempo, colocando círculos percorridos uniformemente pelo planeta excêntricos com a Terra.

- O brilho dos planetas varia, o que era atribuído a um menor ou maior afastamento da Terra.

Para responder à primeira e terceira anomalias, foi proposto que os astros se movessem em um círculo (*epiciclo*), cujo centro se movesse ao longo de outro círculo (*deferente*), centrado na Terra. A outra anomalia era mais difícil, mas a solução foi tornar o *deferente* excêntrico. Além disso, para melhorar os resultados experimentais, foi necessário introduzir um outro círculo, ao longo do qual o *epiciclo* se moveria uniformemente (e não mais ao longo do *deferente*); o centro do círculo foi chamado *ponto equânto*.

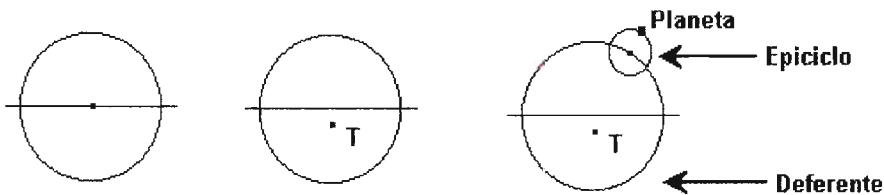


Figura 3.4: O Deferente

Copérnico colocou o Sol no centro e a Terra girando em seu redor. Mas não abandonou as órbitas circulares de Ptolomeu. A mudança de Copérnico permite explicar de modo mais simples a “anomalia” da retrogressão.

O problema de Kepler foi o mesmo de Ptolomeu: Calcular as excentricidades [11]. Mas ele tinha melhores dados de Marte e pôde almejar uma melhor precisão. Mesmo assim, seu cálculo não foi automático: Ele usou artifícios inteligentes e fez hipóteses ousadas. Em resumo, no meio de seus cálculos, Kepler elaborou três hipóteses [12]:

- As órbitas planetárias não eram circulares, mas elípticas.
- A linha ligando o Sol ao planeta descreveriam arcos iguais no mesmo tempo.
- A razão entre o quadrado do período da órbita do planeta e o cubo do raio médio de sua órbita é uma constante.

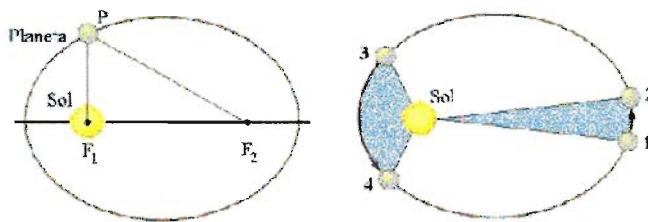


Figura 3.5: A Lei da Áreas

3.4.1 A Maçã

Newton formulou a *Teoria da Gravitação Universal* na última parte de seu *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, publicado em 1687.

Uma lenda na História da Física é a lenda da queda da maçã. Segundo a lenda, a motivação principal de Newton teria sido entender porque a Lua não se afastava da Terra. Ele passeava por um jardim e, ao observar uma maçã caindo, ocorreu-lhe a idéia de que o mesmo “poder” que fazia com que a maçã caísse talvez fosse responsável por reter a Lua presa à Terra, impedindo-a de se afastar. Essa idéia teria sido o seu ponto de partida. Aquilo que fazia com que os corpos caíssem nas proximidades da Terra talvez não estivesse limitado a essa faixa de proximidade e se estendesse a distâncias ainda maiores e fosse o motivo que impedissem a Lua de se afastar da Terra.

Segundo Isaac Bernard Cohen [13], Newton interessou-se pelo problema que o levou à Gravitação, após ser contatado por Robert Hooke e não após ter observado a queda de uma maçã. Supõe-se que a estória tenha sido inventada por Newton, a fim de mostrar que a Gravitação teria sido descoberta por ele, muito antes do contato de Hooke. Newton e Hooke tiveram uma contenda a respeito da descoberta da lei $\frac{1}{r^2}$ e Newton teria inventado a estória para tornar crível que teria descoberto a lei muito antes de sua interação com Hooke.

Em novembro de 1679, Hooke escreveu a Newton, convidando-o a comentar sobre um método de sua autoria para descrever movimentos não retilíneos. Hooke sugeriu, também, que a força entre o planeta e o Sol variasse inversamente com o quadrado da distância de separação. Este foi o ponto em que Hooke parou. Newton respondeu a Hooke que essa análise era nova para ele.

Hooke apresentou, ainda, a Newton um problema, que pode ser parafraseado como se segue: Se um corpo sofre uma força atrativa em direção a um centro, que tipo de curva seria sua órbita, se a força varia inversamente com o quadrado da distância? Newton teria provado que uma elipse poderia satisfazer às condições impostas por Hooke, mas não se sabe com certeza: Quando Edmund Halley, o famoso astrônomo, o visitou em 1684 e perguntou a Newton qual seria a curva descrita pelos planetas, supondo a força de atração do Sol ser proporcional ao quadrado da distância, Newton respondeu, imediatamente, que, segundo seus cálculos, era uma elipse, porém não achou os cálculos.

A tese de Isaac Bernard Cohen é a seguinte:

1. Newton chegou à *Gravitação Universal* por uma aplicação de sua *Terceira Lei*.
2. A *Terceira Lei* só foi formulada por ele no último rascunho do *Principia*, por volta de 1685. Logo, a história da maçã é falsa, pois teria ocorrido 20 anos antes.
3. Foi aplicando o método de Hooke que Newton aprendeu a tratar órbitas não retilíneas.

3.4.2 O Método de Hooke

A idéia de Hooke consiste em separar um movimento central em duas componentes: Uma componente inercial, o movimento que o corpo teria, se continuasse a se mover com a

velocidade instantânea, sem forças atuando; um “soco” em direção a um centro atrativo (centrípeto), isto é, um “impulso” instantâneo, radial, na direção de um centro de forças. A figura abaixo ilustra o método.

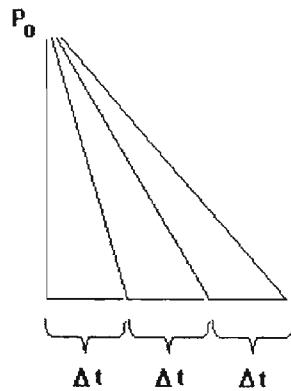


Figura 1

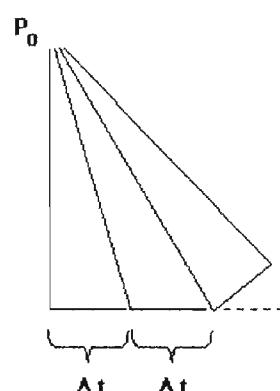


Figura 2

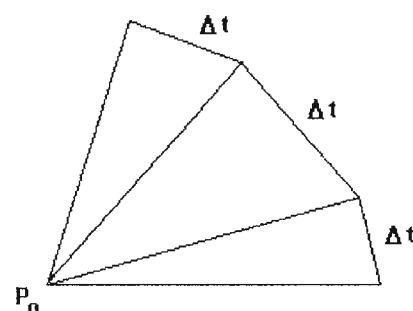


Figura 3

Figura 3.6: O Método de Heeoke

Considere, inicialmente, um corpo movendo-se em uma linha reta a uma velocidade constante. Um ponto é escolhido acima da linha horizontal percorrida pelo corpo (P_0) (figura 1); a cada intervalo igual de tempo, o corpo terá, sucessivamente, posições; esses pontos são ligados a P_0 , formando os triângulos da figura. Os triângulos têm a mesma área, pois têm base de comprimentos iguais e mesma altura (P_0). Em uma segunda situação, o corpo recebe, após um intervalo de tempo, um “soco” (impulso instantâneo ou durando um tempo muito pequeno) na direção do ponto P_0 ; o corpo, agora, move-se em uma linha reta em outra direção (figura 2), mas é possível mostrar, com pequeno trabalho, que as áreas dos triângulos ainda são iguais.

Em uma terceira situação, o corpo recebe “socos” a iguais intervalos de tempo, movendo-se de uma forma poligonal (figura 3), ao redor do ponto escolhido P_0 ; mais uma vez, os triângulos formados têm a mesma área. No caso limite em que o intervalo de tempo entre “socos” sucessivos for muito pequeno, tendendo a zero, o corpo fica sujeito a uma força contínua direcionada para o ponto P_0 e o polígono se torna uma curva uniforme. As áreas continuam conservadas. Esta prova trouxe um significado dinâmico para a lei da área de Kepler.

3.4.3 A Terceira Lei

No último rascunho do *Princípios*, Newton formula a *Terceira Lei* [13]:

As ações de corpos que atraem e são atraídos são mútuas e iguais. Se existirem dois corpos, nem o atraído nem o que atrai podem estar em repouso.

~~Newton~~ compreendeu que se o Sol atrai a Terra, a Terra deveria também puxar o Sol, com uma força de mesma intensidade. Ora, se cada planeta é atraído pelo Sol, então ele atraí o planeta, pela *Terceira Lei*. Então, o planeta é um centro de força atrativa, também. Mas, se assim, cada planeta não só atraí como é atraído pelo Sol mas também atraí e é atraído por cada um dos outros planetas.

A lei do inverso do quadrado seria, apenas, uma parte da Gravitação Universal. A descoberta importante — feita por Newton — é a interação mútua. Cohen argumenta que a forma $\frac{1}{r^2}$ era suficientemente conhecida e é uma consequência da Terceira Lei de Kepler junto com a expressão da “tendência centrífuga”. Newton e, antes dele, Huygens, haviam demonstrado que a “tendência centrífuga” pode ser expressa, em notação moderna, $a = \frac{v^2}{r}$, onde m é a massa, v é a velocidade e r o raio da trajetória. Então, se um corpo se move em um movimento circular uniforme, de raio r :

$$a = \frac{v^2}{r}; v = \frac{2\pi r}{\tau} \text{ onde } \tau \text{ é o período e } \frac{r^3}{\tau^2} \text{ é constante, pela terceira lei de Kepler.}$$

$$a = \frac{\left(\frac{2\pi r}{\tau}\right)^2}{r} = (2\pi)^2 \left(\frac{r^3}{\tau^2}\right) \frac{1}{r^2}$$

$$a = \text{constante} \times \frac{1}{r^2}$$

Newton entendeu que as leis eram válidas para um sistema de um único corpo: Um ponto singular com massa em um campo de força central. Ele reconheceu que este sistema não corresponde ao mundo real, mas a uma situação artificial matematicamente mais fácil. O sistema de um corpo reduz a Terra a um ponto com massa e o Sol em um centro de força imóvel. Newton cria o que Cohen chamou de *estilo newtoniano*: Ele parte de uma construção abstrata e introduz novas condições, para adaptar à situação concreta. No caso, a interação gravitacional mútua implica que as três leis de Kepler não são estritamente verdadeiras. Newton mostrou que as leis de Kepler só eram válidas na situação ideal acima.

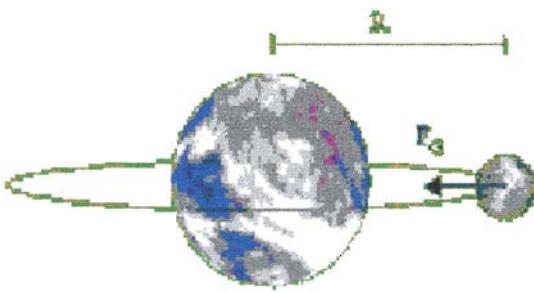


Figura 3.7: A Lei da Gravitação Universal formulada por Newton

Capítulo 4

REFERÊNCIAS

[1]

MEC. *Parâmetros Curriculares para o Ensino Médio*, Parte III, 1999.

[2]

MOREIRA, MARCO A. e MASINI, E. F. S. *A Aprendizagem Significativa. A Teoria de David Ausubel*, Editora Moraes, 1982.

[3]

SOUZA, M. T. M. de, DIAS, P. M. C., SANTOS, W. M. S., *Um Novo Ensino da Gravitação Universal*, in: Garcia, Nilson M. D. (org), Atas do XV Simpósio Nacional de Ensino de Física, 1 CD-ROM., 1224-1231.

[4]

MAGALHÃES, MURILO F.; SANTOS, WILMA M.S.; DIAS, PENHA M. C. *Uma Proposta Para Ensinar os Conceitos de Campo Elétrico e Magnético: Uma Aplicação da História da Física*, Revista Brasileira de Ensino de Física, **24** (2002), 489-496.

[5]

SANTOS, W.M.S., DIAS, P.M.C. *O Passado, o Presente e o Cotidiano*, in: Garcia, Nilson M.D. (org), Atas do XV Simpósio Nacional de Ensino de Física, 1CD-ROM., 1605-1613.

[6]

ALVARENGA, BEATRIZ; MÁXIMO, ANTONIO *Curso de Física*, Editora Scipione, 3 vols., 2000.

[7]

GASPAR, ALBERTO *Física*, Editora Ática, 3 vols., 2000.

¹³
FRANKLIN, ALLAN. *Principle of Inertia in the Middle Ages*, American Journal of Physics, **44** (1976).

[9]

DIAS, PENHA M. C. *O Teorema da Velocidade Média: Um Antecedente Medieval da Física de Galileu*, Revista Perspicillum, **6** (1992), 9-24.

[10]

GALILEU GALILEI *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems*, University of California Press, 1967.

[11]

KUHN, THOMAS S. *The Copernican Revolution*, Harvard University Press, 1957.

[12]

CURTIS, WILSON. *How Did Kepler Discover His First Two Laws?*, Scientific American, **226**, 93-106 (1972)

[13]

COHEN, ISAAC BERNARD. *Newton's Discovery of Gravity*, Scientific American, **244** (1981), 166-179.