

Universidade de Évora



Mestrado em Física para o Ensino

Departamento de Física

**Uma abordagem das Leis de Kepler nos
Ensinos Básico e Secundário**

Hermenegildo Domingos dos Santos Pateiro

**Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Física para o
Ensino, orientada pelo Professor Doutor Mourad Bezzeghoud.**

"Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri."

Évora, Fevereiro de 2007

Universidade de Évora



Mestrado em Física para o Ensino

Departamento de Física

**Uma abordagem das Leis de Kepler nos
Ensinos Básico e Secundário**

Hermenegildo Domingos dos Santos Pateiro



163 304

**Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Física para o
Ensino, orientada pelo Professor Doutor Mourad Bezzeghoud.**

"Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri."

Évora, Fevereiro de 2007

Aos meus pais (André e
Adelaide) e aos meus filhos
(Gonçalo e Francisco).

Agradecimentos

Ao professor doutor Mourad Bezzeghoud pela sua contínua disponibilidade, amizade e espírito crítico. Sem o seu contínuo apoio e motivação esta tese dificilmente teria chegado ao fim.

Aos professores doutores Bento Caldeira e José Borges pela ajuda, disponibilidade e esclarecimento de dúvidas.

Pelo seu empenho na execução do aparato experimental, ao técnico Josué Figueira do Departamento de física da Universidade de Évora.

Ao professor Luís Serra, e aos alunos Ana Terrasso, Ana Tomáz e Laura Figueiras pela sua colaboração aquando dos trabalhos por nós propostos.

Pela sua preciosa ajuda nas traduções de e para Inglês à professora Dina Costa e à minha sobrinha Ana Matias.

Pela ajuda constante na correcção e discussão da parte histórica ao professor Henrique Gonçalves.

Pela relação de amizade e grande união aos colegas de mestrado António Rosmaninho e Jorge Magarreiro.

Índice

Resumo.....	i
Abstract.....	iii
Índice.....	v
Índice de Figuras.....	ix
Introdução.....	1
Capítulo 1 – Johannes Kepler.....	5
Introdução.....	5
Os antepassados.....	6
A formação académica.....	7
As primeiras observações, as primeiras dúvidas.....	8
O primeiro casamento.....	8
Os primeiros trabalhos e a necessidade de se corresponder..	10
As primeiras impressões da “elite”: Galileu e Tycho.....	12
O final do século XVI.....	13
Tycho Brahe, o observador do Céu.....	13
A morte de Brahe, abertura de novos horizontes.....	17
Outra vez Galileu Galilei.....	18
O ano de 1611.....	20
O segundo casamento, as Tábuas Rodolfinas e as acusações de bruxaria da sua mãe.....	20
Os últimos anos.....	21
Tábua cronológica (1500-1650).....	22
Conclusão.....	25
Capítulo 2 – As Leis de Kepler.....	27
Introdução.....	27
As observações de Marte.....	28

A transversalidade do meio sociocultural e científico.....	28
O “saber estar” de Galileu.....	30
A segunda lei.....	31
A primeira lei.....	33
A resolução de problemas práticos.....	35
A terceira lei.....	35
Conclusão.....	38
Capítulo 3 – O estado da arte.....	41
Introdução.....	41
Revisão da literatura.....	42
Programa Kepler.....	47
Conclusão.....	47
Capítulo 4 – Aplicação das Leis de Kepler nos Ensinos Básico e Secundário.....	49
Introdução.....	49
Ciências Físico-Químicas (7º ano).....	51
Física e Química A (11/12º ano).....	54
Física (12º ano).....	57
Área de Projecto (12º ano).....	61
Conclusão.....	61
Capítulo 5 – Desenvolvimento e construção do Dispositivo Experimental.....	63
Introdução.....	63
A escolha do declive.....	65
Construção do dispositivo experimental.....	66
Princípio de funcionamento.....	70
Conclusão.....	71

Capítulo 6 – Análise e sistematização de dados recolhidos.....	73
Introdução.....	73
Manipulação manual da esfera, observações a olho nu.....	73
As filmagens.....	74
A recolha dos dados.....	74
O tratamento e sistematização de dados.....	75
Conclusão.....	83
Conclusão.....	85
Trabalho futuro.....	87
Bibliografia.....	91
Webografia.....	97
Anexos.....	99
Anexo A.....	99
Anexo B.....	102
Anexo C.....	105
Anexo D.....	107
Anexo E.....	108
Anexo F	111
Anexo G.....	113
Anexo H	116

Índice de figuras

Figura 1 - Johannes Kepler.....	xi
Figura 2 - Retrato de Johannes Kepler.....	5
Figura 3 – Retrato de Bárbara, sob a forma de medalha.....	9
Figura 4 – Retrato de Kepler, sob a forma de medalha.....	9
Figura 5 – Taça de Kepler.....	11
Figura 6 – Sistema planetário de Kepler.....	12
Figura 7 – Retrato de Tycho Brahe.....	14
Figura 8 – Pintura de Uraniburgo.....	14
Figura 9 – Retrato de Frederico II.....	15
Figura 10 – Retrato de Rodolfo II.....	15
Figura 11 – Quadrante com o Nónio de Pedro Nunes.....	16
Figura 12 – Quadrante com escala diagonal com o Nónio de Pedro Nunes,	16
Figura 13 – Página de rosto do livro <i>Astronomia Nova</i>	17
Figura 14 – Retrato de Galileu Galilei.....	19
Figura 15 – Frontispício das Tábuas Rodolfinas.....	21
Figura 16 – Relógio da torre da igreja de Vila Nova de Mil Fontes.....	27
Figura 17 – Última Ceia, Leonardo da Vinci.....	29
Figura 18 – Baptismo de Cristo, El Greco.....	29
Figura 19 – Esquema da segunda lei de Kepler.....	32
Figura 19 A – Esquema da segunda lei de Kepler (representação recente	32
Figura 20 – Esquema da primeira lei de Kepler.....	34
Figura 20 A – Esquema da primeira lei de Kepler (representação recente	34
Figura 21 – Esquema da terceira lei de Kepler.....	36
Figura 21 A – Esquema da terceira lei de Kepler (representação recente	36
Figura 22 – Esquema do dispositivo experimental (Pavilhão do Conhecimento, Lisboa).....	53

Figura 23 – Esquema do dispositivo experimental I (Pavilhão do Conhecimento, Lisboa).....	63
Figura 24 – Maqueta do protótipo.....	64
Figura 25 – Gráfico para elaboração do declive.....	65
Figura 26 – Borracha furada.....	66
Figura 27 – Corte do poliuretano.....	66
Figura 28 – Tiras de poliuretano unidas.....	66
Figura 29 – A espuma.....	66
Figura 30 – Eliminar o excesso de espuma.....	67
Figura 31 – O molde de poliuretano.....	67
Figura 32 – A fita isoladora.....	67
Figura 33 – A fibragem.....	67
Figura 34 – O desenformar.....	67
Figura 35 – O molde.....	67
Figura 36 – A chapa de ferro.....	68
Figura 37 – Fabrico do molde em gesso.....	68
Figura 38 – Molde de gesso pintado.....	68
Figura 39 – A calha e a rampa.....	69
Figura 40 – Testando o aparato.....	69
Figura 41 – O aparato experimental 1.....	70
Figura 42 – O aparato experimental 2.....	70
Figura 43 – O aparato experimental 3.....	70
Figura 44 – O aparato experimental 4.....	70
Figura 45 – Suporte e aparato para as filmagens.....	74
Figura 46 – Filmagem da esfera de ferro.....	74

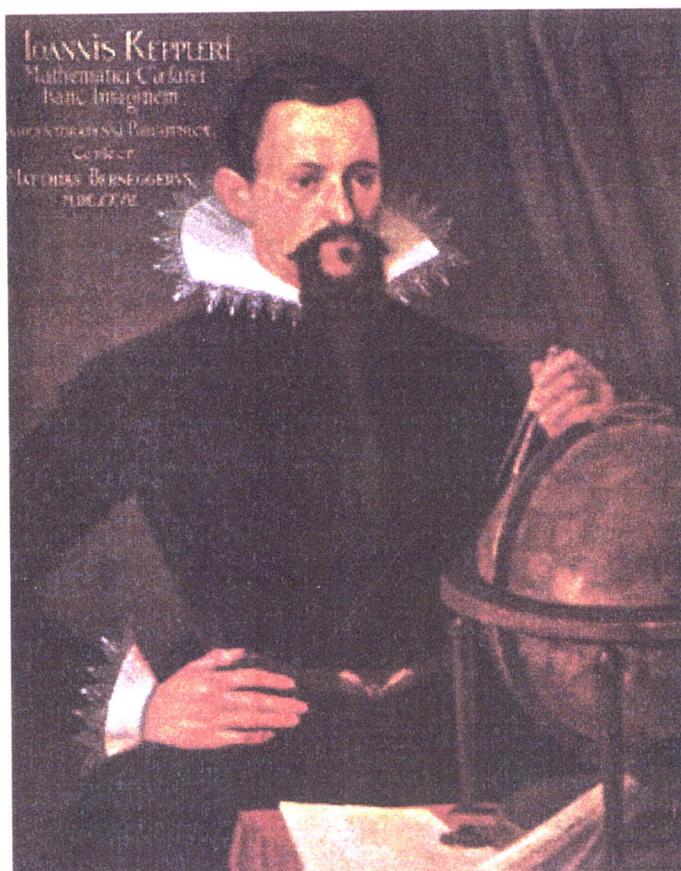


Figura 1 – Johannes Kepler¹

“Quanto mais o homem avança na descoberta dos segredos da Natureza, mais facilmente descobre a universalidade do plano eterno.”²

¹ Retirada de: www.ualg.pt/ccviva/astrologia/historia/johannes_kepler.htm (4/2/07)

² Retirada de: www.elasere.com/interes/showfrases.asp?id=71&exist=yes (4/2/07)

Resumo

Descrevemos de forma breve o que terá sido a vida de Johannes Kepler desde o seu nascimento até à sua morte, abordando também as suas deambulações pela Europa Central, muitas ocasionadas pelas perseguições católicas, mas que na maioria dos casos ajudaram a progredir as suas investigações. Focamos o envolvimento deste com Tycho Brahe, quanto a nós, a “verdadeira fonte” de inspiração e de talento para as descobertas de Kepler.

Propomos uma metodologia de abordagem do tema, ao longo dos ensinamentos básico e secundário, num crescendo de complexidade, de modo a que o ensino-aprendizagem das leis de Kepler e, dos movimentos planetários se torne particularmente interessante.

Explicitamos de forma clara e sucinta como nós projectámos e criámos o nosso aparato experimental. Este protótipo servirá como mais um suporte didáctico a que os professores possam recorrer, aquando da abordagem do tema “Leis de Kepler” nos diferentes níveis de ensino.

Abstract

“An approach to the Laws of Kepler in the Third Cycle and Secondary level teaching”

We shortly describe what probably the life of Johannes Kepler was since his birth till his death, including his deambulations through Central Europe, mostly caused by the catholic persecutions, which helped his investigations to progress. We focus on his involvement with Tycho Brahe, in our opinion, the “real source” of inspiration and talent for Keller’s discoveries.

A methodology consisting of a combined scientific and pedagogic approach of the subject is proposed to be implemented in the Third cycle and Secondary level teaching in Portugal. This approach is developed in such a way that the teaching-learning process of the laws of Kepler and of the planetarium movements will become particularly interesting.

We explain on a clear concise way as we projected and created our experimental display structure. This prototype will serve as one more didactic support which teachers may have as a resource, when they are approaching the subject “The Laws of Kepler” on the different teaching levels.

Introdução

Este trabalho surge da vontade de pesquisar e saber algo mais sobre a contextualização das descobertas de Johannes Kepler, quanto a nós fundamentais para todo o alicerce da compreensão do Universo. Como se trata de uma dissertação de um Mestrado para o Ensino da Física pareceu-nos fundamental incluir no nosso trabalho propostas didáctico pedagógicas de abordagem do tema, bem como a construção de um protótipo experimental com o qual os professores pudessem abordar este tema em sala de aula. Para esta estrutura foram definidos alguns objectivos, que passamos a enumerar:

- Estudar de forma mais aprofundada as leis de Kepler;
- Enquadrar o surgimento das leis no ambiente histórico, político e sócio-cultural da época;
- Explicitar aos alunos que uma lei não é um mero enunciado, mas sim algo com alguma relação experimental;
- Elaborar um protótipo experimental que permita o estudo das leis de Kepler quer qualitativamente, quer quantitativamente;
- Descrever de que forma se devem abordar as leis para os dois níveis de ensino;
- Analisar os dados recolhidos nas experiências de modo a clarificar a utilização do protótipo experimental.

Com esta estrutura ficarão no nosso entender, os professores da disciplina a dispor de mais uma hipótese de abordagem de um tema quanto a nós estruturante e por vezes esquecido aquando do estudo pré universitário da física.

A estrutura do trabalho divide-se em seis capítulos que passaremos a descrever. No final do mesmo irão ser deixadas algumas propostas de trabalho futuro.

No **capítulo 1** tentaremos descrever de forma breve o que terá sido a vida de Johannes Kepler desde o seu nascimento até à sua morte. Abordaremos também as suas deambulações pela Europa Central, muitas ocasionadas pelas perseguições católicas, mas que na maioria dos casos ajudaram a progredir as suas investigações. Caracterizaremos também em traços gerais o ambiente social, político, cultural e económico desta época, pois é nestes contextos que a investigação se desenvolve.

No segundo capítulo tentaremos explicar como Johannes Kepler chegou à escrita das suas famosas leis. Vamos concentrar-nos nestes treze anos da sua vida, sem dúvida os mais produtivos do ponto de vista das publicações. Vamos também descrever o envolvimento de Kepler com Brahe, quanto a nós, a “verdadeira fonte” de inspiração e de talento para as descobertas de Kepler. Explicaremos também o facto de Kepler querer provar que o Universo funciona tal como os mecanismos dos relógios e não apenas por ordem e desejo do Divino.

No Capítulo 3 descreveremos o que se publicou até então sobre as leis de Kepler, mas numa perspectiva didáctica, pois pensamos que para o contextualizar deste trabalho é o mais importante. Assim, focaremos uma tese de mestrado publicada no Brasil na década de 80 (Neves, M. C. D. 1986) e um trabalho publicado em Portugal (Topa, P. 2003) no âmbito de uma disciplina do Mestrado em Estudos da Criança. Descreveremos também vários artigos de revistas científicas publicados entre 1991 e 2003. Neste âmbito focaremos também os diversos sítios da Internet a nível mundial que abordam o tema de forma didáctica, bem como o programa Kepler (Fiolhais C., 1993).

No quarto capítulo propomo-nos criar uma metodologia de abordagem do tema, ao longo dos ensinamentos básico e secundário, em crescendo. No que diz respeito aos programas do Ministério da Educação, pensamos poder incluir alguns aspectos da nossa pesquisa, no sétimo ano de escolaridade na disciplina de Ciências Físico-Químicas; no décimo primeiro ano de escolaridade na disciplina de Física e Química A e no décimo segundo ano de escolaridade na disciplina de Física. Propomo-nos criar um “corpus” que permita que os alunos consigam entender melhor as leis de Kepler. Neste propósito sugerimos a primeira abordagem do tema no sétimo ano de escolaridade, posteriormente no décimo primeiro ou décimo segundo anos, na disciplina de Física e Química A. Finalmente, apenas para os alunos, que optarem por ter a disciplina de Física no décimo segundo ano, criar um novo capítulo no programa de modo a poder abordar estas leis em pormenor. Abordagem que nos parece importante antes da entrada no Ensino Superior, para os alunos que recorram a áreas de formação para que, a Física seja essencial.

Para a exploração destas aulas pretendemos criar textos históricos de valor pedagógico, utilizar o modelo experimental que nos propomos a criar, sugerir a consulta de websites de interesse pedagógico, entre outros assuntos por nós considerados relevantes. Pensamos que, os professores de Físico-Química poderão utilizar as nossas sugestões para as suas aulas, de modo a que o ensino-aprendizagem das leis de Kepler e, dos movimentos planetários se torne particularmente interessante.

No capítulo 5 explicaremos de forma clara e sucinta como nós projectámos e criámos o nosso dispositivo experimental. Este protótipo servirá de mais um suporte didáctico a que os professores possam recorrer, aquando da abordagem do tema “Leis de Kepler” nos diferentes níveis de ensino. Para a sua execução recorreremos ao Pavilhão do Conhecimento, onde observámos um dispositivo básico exposto. Após esta observação pensámos então no que nos propúnhamos a construir. O declive que vai da superfície elíptica ao orifício do protótipo foi calculado com base no facto da intensidade da força gravitacional de um corpo celeste ser inversamente proporcional à distância ao quadrado, a que este se encontra de outro. A primeira fase de construção foi a projecção do molde, foi sendo feita através do processo tentativa e erro e esta situação vai ser descrita ao longo do capítulo.

No sexto capítulo, após a construção do protótipo e com a intenção de poder de alguma forma testá-lo, tornava-se necessário proceder à recolha e sistematização de dados. Numa primeira fase colocámos a esfera de ferro a girar com a mão e verificámos o que acontecia. A descrição da elipse pela esfera enquanto gira, prova a primeira lei de Kepler. Posteriormente arranjámos esferas de material diferente e marcando pontos sobre a órbita, filmámos a órbita descrita pela esfera, com o intuito de obter tempos e distâncias para assim podermos calcular velocidades. Marcámos também duas áreas iguais com o intuito de podermos observar a segunda lei de Kepler.

Capítulo 1

Johannes Kepler (27/12/1571 – 15/11/1630)

Introdução

Neste capítulo tentaremos descrever de forma breve o que terá sido a vida de Johannes Kepler desde o seu nascimento até à sua morte. Abordaremos também as suas deambulações pela Europa Central, muitas ocasionadas pelas perseguições católicas, mas que na maioria dos casos ajudaram a progredir as suas investigações. Tentaremos explicar de alguma forma o ambiente político, económico e social que se vivia na sua época, bem como a vida e postura social dos seus contemporâneos que, de uma forma ou de outra, foram essenciais para a evolução das suas investigações. Também são de realçar os seus dois casamentos, pois foram essenciais para o prosseguir das suas investigações. No final deste capítulo (pág. 20), antes da conclusão, apresentamos uma tabela cronológica, abrangendo o período compreendido entre 1500 e 1650, com alguns dos factos mais importantes a nível político, cultural e social desta época. A última coluna da tabela refere também os factos ligados à astronomia que ocorreram naquele intervalo de tempo.



Figura 2 – Johannes Kepler, retrato de 1610.³

³ Extraída de Ferguson, 2002, pág. 194 A

Muito embora se tenham recolhido informações de várias fontes para a escrita da biografia de Kepler, os dois autores mais lidos foram Fergusson K. (2002) e Mourão R. (2003)

Os antepassados

Pensamos que Kepler descende de uma família alemã, nobre e protestante, (o seu bisavô era membro da corte nos finais do século XV) que terá entrado em declínio na geração do seu pai, Heinrich Kepler (1547 – 1590). Sabemos que os seus antepassados exerceram cargos na corte, nomeadamente, na geração do seu trisavô, os seus irmãos, Konrad e Friedrich, foram armados cavaleiros pelo Imperador Sigismund, em Roma, em 1433. O seu avô Sebaldus Kepler, em 1520, emigra da sua cidade natal, Nuremberg, para ir viver em Weil, onde passou a exercer a actividade de peleiro e dono de campos de repolho, o que lhe valeu o título de burgomestre (presidente da câmara) de Weil. A melhor maneira de conhecer os antepassados de Kepler é através da leitura do seu horóscopo genealógico⁴, escrito em 1597, onde Johannes Kepler retrata, pensamos que, fielmente, o que foram os seus antepassados. Ele descreve-os de forma bastante dura, mas mais tarde acrescenta outras frases, agora mais suaves, sobre as pessoas que já tinha descrito anteriormente. Neste horóscopo percebemos facilmente que a decadência da sua família começa no fim da vida do seu avô e, que se degrada cada vez mais durante a vida do seu pai, sobre o qual, Kepler escreve o seguinte:

“O quarto, Heinrich, meu pai, nasceu em 19 de Janeiro de 1547. Homem pecaminoso, inflexível, briguento, estava destinado a um péssimo fim. Vénus e Marte, aumentavam-lhe a maldade. O declínio da maior aproximação de Júpiter fê-lo pobre, mas deu-lhe uma rica esposa. Saturno fê-lo estudar a ciência da artilharia. Teve numerosos inimigos, um casamento de conflitos. Tinha pouco amor às honras e uma vã esperança nelas. Foi um errante... Em 1577 correu o risco de ser enforcado. Vendeu a casa e começou a trabalhar com uma taverna. Em 1578, a explosão de um

⁴ Nesta altura os astrónomos eram também astrólogos, muitas vezes era com a astrologia que se conseguiam sustentar.

jarro de pólvora dilacerou o rosto de meu pai... Em 1589, tratou muito mal a minha mãe. Acabou exilando-se e logo morreu.” Kepler⁵

Os seus pais casaram, ambos com 24 anos de idade, no dia 15 de Maio de 1571. Segundo o horóscopo, elaborado por Kepler, ele foi concebido a 16 de Maio, vindo a nascer no dia 27 de Dezembro de 1571, na cidade católica de Weil, na Suábia (hoje, Weil der Stadt, Alemanha). Kepler nasceu muito franzino e sofreu de várias doenças e maleitas ao longo de toda a sua vida, o que muitas vezes condicionou a sua condição de estudante. Foi baptizado como Johannes, em homenagem ao santo desse dia, o apóstolo João Evangelista, sendo o primeiro filho de Heinrich Kepler (1547- 1590) e de Katherine Guldemann (1547-1622).

Os seus pais tiveram mais seis filhos, três dos quais morreram na infância e três sobreviveram: Heinrich, Margarete e Christopher.

A formação académica

Como pertencia a uma família pobre, a sua infância foi muito dura e frequentou de modo bastante irregular a escola. A sua sorte mudou um pouco quando foram viver para Leonberg em 1576, onde passou a viver com os seus avós, afastando-se das permanentes discussões e agressões dos seus pais. Nesta cidade, os Duques locais tinham desenvolvido um sistema educativo eficiente.

Em 1578 iniciou a escola elementar em alemão, como o professor percebeu que se tratava de um jovem com grande potencial, resolveu orientá-lo para uma escola latina. Aos treze anos fez exame de bacharel com enorme sucesso e mostrou vontade de ingressar no seminário para seguir uma carreira religiosa. Em 16 de Outubro de 1584 ingressa no seminário de Adelberg, dois anos mais tarde passa para o seminário de Maulbronn e a 3 de Setembro de 1588 passa no exame de admissão à Universidade de Tuebingen, onde ingressa a 17 de Setembro de 1589. Até 1593 estuda nesta Universidade, onde para além da Teologia, se apaixona pela cadeira de Matemática e Astronomia, muito por culpa do seu professor, Michel Maestlin, defensor do sistema

⁵ Citado por Mourão, 2003, pág. 25 e 26

Ptolomaico, mas que ensinava muito mais de acordo com a perspectiva de Nicolau Copérnico (1473-1543) do Universo – o Heliocentrismo.

Após a Universidade, onde obteve notas brilhantes foi convidado para ser professor de Matemática no seminário protestante de Graz, capital da Estíria (actual Áustria), onde chega a 11 de Abril de 1594. Neste período da sua vida (1594-1599) Kepler dedica-se ao ensino e à astronomia, onde se impõe como calendarista da cidade (previa o clima, guerras, epidemias,...). Nesta fase, Kepler foi muito mais popular como calendarista do que como professor. Os seus alunos tinham dificuldade em acompanhar o seu raciocínio e foram desistindo da sua cátedra.

As primeiras observações, as primeiras dúvidas

Entre 1599 e 1600, sem trabalho, aproveitou para se dedicar à observação dos céus e principalmente ao movimento dos planetas. Surge-lhe então a ideia de relacionar os cinco sólidos platónicos perfeitos (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro) com os seis planetas que se conheciam na altura (Mercúrio, Vénus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno). Achava que os cinco sólidos descreveriam as distâncias existentes entre os seis planetas, sendo um sólido para cada distância.

O primeiro casamento

Envolvido por toda esta mística de observação e cálculos, Kepler conhece Bárbara Mueller (1574⁶-1611), com quem viria a casar no dia 27 de Abril de 1597.

Durante esta fase escreveu várias vezes ao seu antigo professor de Astronomia de Tuebingen, achando que Deus o tinha colocado no caminho de tentar provar esta teoria, à qual teria de dedicar 24 horas por dia. Explicava que tinha começado a namorar, e que o facto poderia beneficiá-lo, para a investigação, uma vez que a namorada provinha de um meio socio-económico alto, como se demonstra no seguinte extracto de uma sua carta:

⁶ Nascimento calculado a partir da idade (36 anos) e data da sua morte (1611).

“...it is certain that I am for my bride has properties, friends and a Wealthy father here. It seems that I would not, after a few years, need any salary, if that would suit me. However, I could not leave the land unless a public or private misfortune befell. A public one if the land were no longer safe for a Lutheran or if it were further pressed by the Turk... a personal misfortune if my wife were to die. Thus a shadow hovers over me. Yet I dare not ask more of God than He in these days allots to me.”
Kepler⁷

O seu casamento com Bárbara dura 14 anos, devido à morte da sua mulher a 3 de Julho de 1611. Deste casamento nascem 6 filhos, um nasce morto e três morrem nos primeiros anos de vida. Apenas dois chegam à vida adulta, Friedrich e Ludwig, pois Kepler nunca foi feliz no casamento. Para expressar essa infelicidade Kepler descreve a sua esposa como de:

“compleição estúpida, sempre de mau humor, solitária e melancólica”
Kepler⁸



Figuras 3 e 4 – Johannes Kepler e Barbara retrato sob a forma de medalhas do seu casamento, 1597.⁹

⁷ Citado por Ferguson, 2002, pág. 196

Tradução: “é certo que sou uma vez que a minha noiva tem propriedades, amigos e um pai Rico aqui. Pareceria que dentro de alguns anos eu não precisaria de qualquer salário, se assim me aprovesse. Contudo eu não abandonaria a terra a menos que um infortúnio público ou privado acontecesse. Público se esta terra não fosse mais segura para um Luterano ou fosse pressionada pelos Turcos... um infortúnio pessoal se a minha mulher morresse. Assim uma sombra paira sobre mim. Ainda assim, não me atrevo a pedir mais a Deus do que, nestes dias, Ele me destinou.”

⁸ Citado por Mourão, 2003, pág. 59

⁹ Extraídos de Ferguson, 2002, pág. 194 G

Os primeiros trabalhos e a necessidade de se corresponder

O seu primeiro trabalho como astrónomo surge em 1596, com o título abreviado “Mysterium Cosmographicum”. Este trabalho necessitou da autorização da comissão de teologia da Universidade de Tuebingen, e Kepler foi alertado para apenas tratar a teoria heliocêntrica como mera hipótese matemática. Kepler tentou fazê-lo, mas ao longo do seu livro aparecem descrições de uma astronomia nova, a astronomia defendida por Copérnico. Esta mensagem de uma nova astronomia compreende-se facilmente, por exemplo, neste extracto do vigésimo capítulo do seu livro:

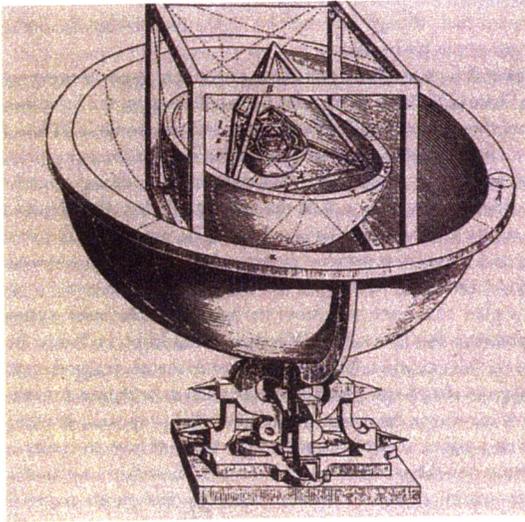
“... se quisermos nos aproximar mais da verdade e encontrar qualquer regularidade nas proporções [entre as distâncias e as velocidades dos planetas], devemos escolher de duas coisas uma: ou as almas motrizes [que movem os planetas] estão mais fracas, quanto mais distantes se encontram do Sol, ou existe uma única alma motriz colocada no centro de todas as órbitas (isto é, no Sol) que move tanto mais vigorosamente um corpo qualquer quanto mais próximo se encontra dele [o Sol], e nos corpos mais distantes, em razão do afastamento e da redução da sua força, ela enfraquece.” Kepler¹⁰

Após a conclusão do livro, Kepler pede para viajar para Wuerttemberg, para preparar os originais para a publicação. Ficou nesta cidade sete meses para terminar o seu projecto “a Taça de Kepler”, onde foi representado o seu modelo cósmico. Para a execução do projecto foram fundamentais os apoios de Maestelin (parecer técnico) e de Frederico I, Duque da cidade (apoio financeiro). Passados dois anos, o projecto foi abandonado, por se ter revelado muito dispendioso.

Desde Maio de 1543, quando Nicolau Copérnico escreve a sua obra “De Revolutionibus Orbium Coelestium”, onde expunha a teoria heliocêntrica, em oposição à teoria geocêntrica de Claudio Ptolomeu, que vigorava quase há quinze séculos, que ninguém publicava nada em defesa da teoria de Nicolau Copérnico. Convém salientar que Copérnico se referiu de forma perfeitamente clara ao movimento da Terra à volta do

¹⁰ Citado por Mourão, 2003, pág. 54

Sol, facto que o levou a ser condenado pela Inquisição, como ele descreve no livro atrás referido:



“(…) Mas se alguém pensasse que a Terra se move, diria certamente que esse movimento é natural, e não violento. Ora, as coisas que se fazem conforme à natureza produzem efeitos contrários dos que se fazem com violência. As coisas, com efeito, a quem é aplicada a força, ou a violência, têm necessariamente de ser destruídas e não são capazes de subsistir muito tempo; mas as que são feitas pela natureza são-no de uma maneira conveniente e permanecem na sua melhor disposição.” Copérnico¹¹

Figura 5 – Taça de Kepler, desenhada por ele no seu livro “Mysterium Cosmographicum”.¹²

É então Kepler que, publica o trabalho atrás mencionado (“Mysterium Cosmographicum”), em defesa da referida teoria, embora disfarçado com algumas nuances e credices religiosas, que faziam com que a recusa do sistema ptolomaico, fosse quase “dolorosa”. Mais tarde, assim que recebe os primeiros trabalhos publicados, trata de enviar imediatamente alguns exemplares ao seu antigo professor de Tuebingen, para que os distribuísse na cidade. Envia também um exemplar às duas figuras mais importantes da época, no que se referia à astronomia: Galileo Galilei (1564-1642) e Tycho Brahe (1546-1601).

¹¹ Citado por Koyré, 1992, pág.208

¹² Extraído de idem, pág. 57

As primeiras impressões da “elite”: Galileu e Tycho

Após a recepção do seu livro, os dois eminentes observadores celestes respondem a Kepler. Galileu, que vivia em Pádua, responde a Kepler com uma carta datada de 4 de Agosto de 1597, de forma cautelosa, dando a entender que também defendia a teoria copernicana, há vários anos, ao contrário da maioria dos iluminados da altura que ironizavam e tentavam ridicularizar a obra desse grande pensador. Tycho Brahe, o mais notável astrónomo da época, responde-lhe em carta datada de 1 de Abril de 1598. Menos efusivo que Galileu, aconselha-o a abandonar as especulações, a dedicar-se incansavelmente à observação e só por fim estudar as causas do que concluisse com as observações.

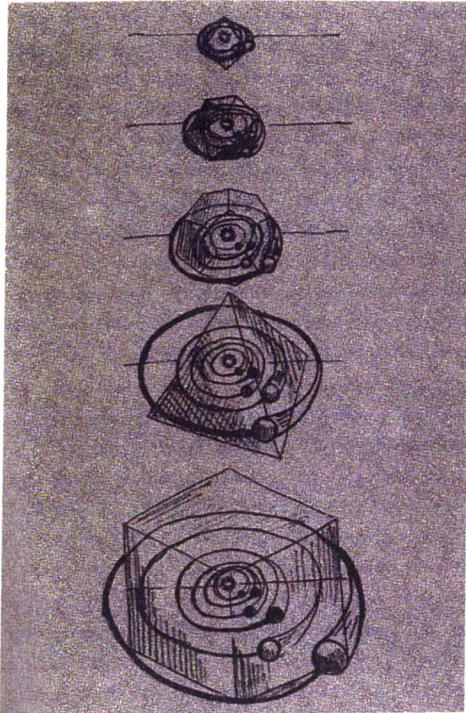


Figura 6 – Sistema planetário de Kepler, registado no seu livro.¹³

Embora Kepler soubesse que Tycho defendia um sistema entre o de Ptolomeu e o de Copérnico, (ao redor da Terra e da Lua girava o Sol, em torno do qual giravam os outros 5 planetas), achava que seria através dos longos anos de observação e registos do céu, feitos por Tycho, que um dia se provaria a teoria de Copérnico. Salientemos porém o facto de Brahe tentar conciliar o seu “geocentrismo religioso” com o “heliocentrismo observável”, foi uma crença religiosa que se veio a demonstrar fatal, pois impediu-o de ver mais além. A obsessão e o respeito de Kepler pelas observações de Tycho, são bem demonstrados numa carta de Fevereiro de 1599, que ele escreve a Maestlin:

“Calemo-nos e escutemos Tycho Brahe, que dedicou às observações trinta e cinco anos... Somente por Tycho Brahe é quem espero; ele me explicará a ordem e a disposição das órbitas... Espero, então, um dia, se Deus me der vida, erguer um admirável edifício.” Kepler¹⁴

¹³ Extraído de Mourão, 2003, pág. 49

¹⁴ Citado por idem, pág. 70

O final do século XVI

Os últimos dois anos do século XVI foram devastadores para a vida de Kepler. Morrem-lhe dois filhos, outros dois membros da família também sucumbem à peste e começam as reformas contra Lutero, (contra-reforma da igreja católica) que levam à expulsão de todos os protestantes da Áustria. Por autorização expressa do príncipe, Kepler permanece em Graz, sabendo que essa licença seria temporária. Começa então a preparar a sua saída da Áustria, sabendo que Tycho Brahe, tinha saído da Dinamarca para a Boémia, encontrando-se em Praga, protegido pelo Imperador Rodolfo II. Kepler parte para Praga, onde vem a encontrar-se com Tycho, no dia 4 de Fevereiro de 1600.

Nesta altura, Kepler era um jovem de 29 anos, e Tycho um homem de 53 anos de idade, com alguns problemas de saúde. Pelas cartas que foram trocando, ambos se tinham apercebido que a sua união era imprescindível, para poder avançar com a tal “astronomia nova” que Kepler tanto procurava. Tiveram algumas discussões, que levaram Kepler a abandonar o castelo de Benatky, indo para Praga. Tycho, consciente da necessidade de ter Kepler por perto, vai buscá-lo. Após este início de relação, algo conturbado, começam a observar e discutir tudo o que já tinha sido observado por outros. Juntos avançam em direcção a qualquer coisa que ambos sabiam que iria mudar a concepção sobre os “céus”.

Tycho Brahe, o observador do Céu

Parece-nos importante salientar alguns aspectos fundamentais na vida de Tycho Brahe, já que este será o grande responsável pela mudança radical na vida de Kepler. Brahe nasce a 14 de Dezembro de 1546 em Knudstrup, na Dinamarca, filho do nobre Otto Brahe. A vida de Tycho foi marcada por quatro eventos astronómicos, todos eles marcantes na sua vida. Esses eventos foram: o eclipse parcial do Sol (1560), a conjunção de Júpiter com Saturno (1563), descoberta da “stella nova” na constelação de Cassiopeia (1572) e a passagem do cometa (1577). Cada um dos eventos atrás descritos teve repercussões na vida de Tycho. O primeiro evento, observado quando ele tinha apenas 14 anos desperta-o para a observação celeste. O seguinte revelou-lhe as falhas das tabelas astronómicas e mostrou-lhe como era necessário observar continuamente o

céu, esboçando registos, e também o facto de ser crucial o aperfeiçoamento dos instrumentos de observação. O terceiro, demonstrou-lhe que o céu era mutável, o que contrariava Aristóteles, Platão e os cristãos. Por último, conseguiu explicar que o cometa estaria pelo menos 6 vezes mais distante da Terra do que a Lua, outro “tiro” na teoria de Aristóteles que dizia que os cometas se encontravam no mundo sublunar (abaixo da órbita da Lua).



Mesmo com todas estas descobertas, Brahe tentou sempre não fugir às suas crenças religiosas, e nunca conseguiu abandonar completamente o sistema Geocêntrico. Outro marco importante na vida de Tycho é a construção de Uranilburgo na Dinamarca, na ilha de Hveen que lhe foi oferecida pelo rei Frederico II da Dinamarca, como está comprovado num decreto do rei, datado de 23 de Maio de 1576:

Figura 7 – Tycho Brahe, retrato do seu livro “Astronomiae Instauratae Mechanica”, 1598.¹⁵



“Nós, Frederico II, damos a conhecer a todos que transferimos e concedemos, por esta carta aberta, ao nosso amigo Tycho Brahe, filho de Otto, de Knudstrup, nosso varão e servo, a ilha de Hveen, com todos os arrendatários e servos, bem como os da Coroa que aí residem, com todas as rendas e os encargos oriundos e que são arrecadados a nós e à Coroa, para que a possua, use e retenha livre, sem qualquer renda, por toda a vida e enquanto desejar seguir os seus estudos matemáticos...”¹⁶

Figura 8 – Pintura de Uranilburgo.¹⁷

¹⁵ Extraído de Fergusson, 2003, pág. 194 A

¹⁶ Citado por Mourão, 2003, pág. 87

¹⁷ Extraído de br.geocities.com/salafisica9/biografias/brahe.htm (3/2/2007)



Após a morte do seu protector, Frederico II, em 1588, Cristiano IV, que lhe sucede, retira o apoio ao astrónomo e começa a investigá-lo. Descobriu-se que não tinha baptizado os filhos segundo as normas e Brahe sentindo-se perseguido, decide deixar Uranilburgo, em Abril de 1597, após 20 anos

Figura 9 - Frederico II, pintura.¹⁸

dedicados à constante observação dos céus e aos registos sistemáticos das suas observações. Abandona a Dinamarca em 1597, passando por Rostock e Wandsbeck. Em 1599, o rei Rodolfo II da Boémia (hoje, República Checa), convida-o para se instalar no seu castelo de Benatky, perto de Praga, onde foi nomeado matemático imperial, para continuar as suas observações.



Tycho Brahe publica duas obras extremamente importantes para o conhecimento da Astronomia, “Mundi Aetherei Recentioribus Phaenomenis” (Sobre o novo Fenómeno do Mundo Etéreo), em 1588 e “Astronomiae Instauratae Mechanica” (Digressões sobre Mecânica Astronómica), em 1598. Nesta obra Brahe refere-se a quadrantes usando o nónio, concebido por Pedro Nunes. Sobre os quadrantes o autor afirma que estão divididos

Figura 10 – Rodolfo II, pintura.¹⁹

com as habituais transversais, mas também utilizam o nónio do famoso matemático hispânico. A razão que terá levado Tycho a utilizar o nónio, foi o facto deste astrónomo pretender observar os céus com a máxima precisão possível. Brahe fabricava os seus próprios instrumentos e melhora o nónio concebido por Pedro Nunes, como se prova nas palavras De Brahe escrevendo ao astrónomo alemão Cristóvão Rothmann:

¹⁸ Extraído de www.brathair.outonos.com, (8/5/2006)

¹⁹ Extraído de Ferguson, 2002, pág. 194 H

“Mas, logo que em seguida, comecei a tomar rigorosamente a altura dos astros com a ajuda de quadrantes e me apercebi pela experiência, que a divisão comum, levada o mais longe possível, não era suficiente nos pequenos instrumentos, recorri ao subtil processo que Nunes apresenta na terceira preposição do seu De Crepusculis, e o tomei exacto, aumentando o número de subdivisões e calculando tábuas pelas quais se poderia conhecer imediatamente e com precisão a altura de um ponto qualquer. E, como esta invenção de Nunes, assim como a experiência me tinha provado, não satisfazia as suas promessas, eu pergunto-me se o processo, pelo qual se chega, por meio de pontos transversais, a dividir uma recta em partes muito pequenas, não poderia aplicar-se também às linhas curvas.”²⁰ Kepler

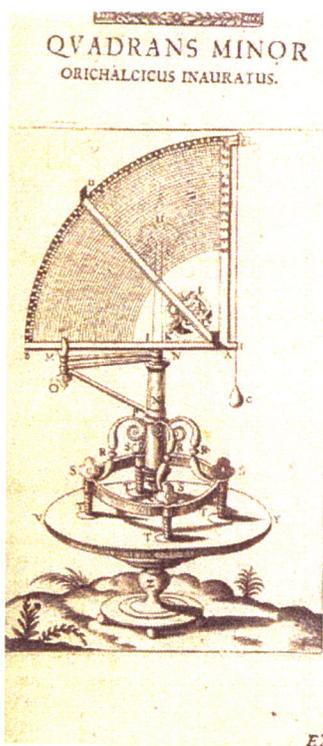


Fig 11 – Quadrante, dispondo do Nónio de Pedro Nunes, gravura inserida na obra Astronomiae Instauratae Mechanica.²¹

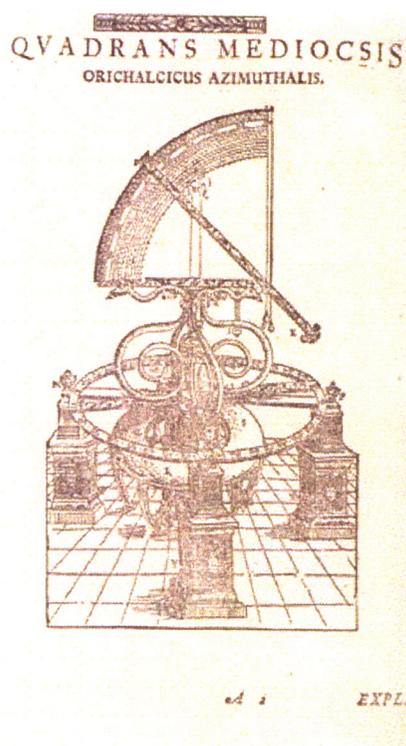


Fig 12 – Quadrante com escala diagonal com o nóvio de Pedro Nunes, gravura inserida na obra Astronomiae Instauratae Mechanica.²²

²⁰ Extraído de www.instituto-camoes.pt/cvc/ciencia/e20b.html (20/02/07)

²¹ Extraído de idem

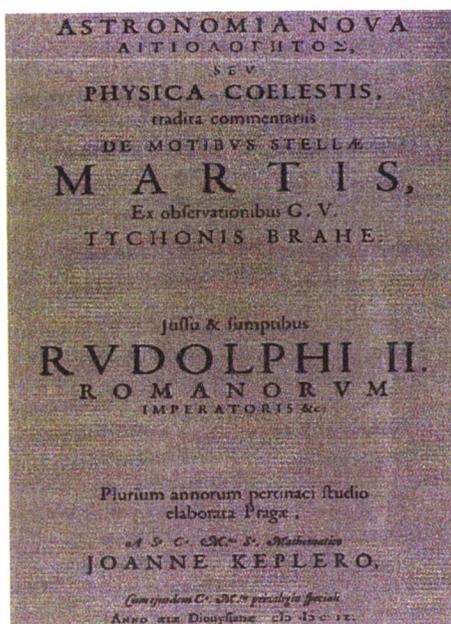
²² Extraído de ibidem

A morte de Brahe, abertura de novos horizontes

Já com Kepler perfeitamente integrado em Praga, e a trabalhar com Tycho, este adoece e apercebendo-se que vai morrer, designa Kepler como seu sucessor. No dia 24 de Outubro de 1601 morre Tycho Brahe. No dia 6 de Novembro de 1601 Kepler foi nomeado matemático imperial por Rodolfo II, e aproveitou o facto para trazer a sua família à Corte, duas gerações depois de ter entrado em declínio. Kepler fornece então para edição, em 1603 a obra-prima de Brahe, com o título “Tychonis Brahe Astronomiae Instauratae Progymnasmata” (Novos Conceitos Astronómicos de Tycho Brahe).

A partir daqui, Kepler dedica-se a estudar tudo o que Brahe tinha registado. Neste período extremamente fértil da sua vida, cria duas novas “ciências”: a Óptica Instrumental e a Astronomia Física, precursora da Mecânica Celeste. Publica nos mais diversos campos (Astrologia, Astronomia, Óptica,...). A sua companhia era disputada por todos os intelectuais que tinham a protecção do Imperador de Praga.

Em 1604 acaba o seu livro “Astronomiac pars Optica” (A Parte Óptica da Astronomia), considerado desde logo um livro fundamental sobre o tema. Em 1605, quando estudava a trajectória de Marte, descobre que as órbitas planetárias não eram circulares, mas sim elípticas, sendo o Sol, um dos focos da elipse. Esta constatação permite-lhe chegar, alguns anos mais tarde, ao enunciado da primeira lei (ver capítulo 2).



Em 1609 surge o “Primeiro livro de Astronomia”, segundo Max Caspar (citado por Mourão, 2003, pág. 113), livro de Johannes Kepler, com o título “Astronomia Nova seu Physica Coelestis tradita commentariis de motibus stellae Martis” (Astronomia Nova, fundada sobre as causas, ou Física Celeste, exposta em comentários sobre o movimento da estrela Marte), que foi publicado em 1609, em Heidelberg e baseou-se em todas as observações de Kepler.

Figura 13 – Página de rosto do livro Astronomia Nova.²³

²³ Extraído de Mourão, 2003, pág. 116

Nesta obra, o astrónomo estuda Marte de acordo com as observações de Ptolomeu, Copérnico, Brahe e as suas próprias. A construção desta obra foi algo tortuosa, como fica bem demonstrado nas palavras de Koesteler:

“começou e acabou com actos de apropriação indébita, cometidos em nome da glória de Deus” Koesteler²⁴

Ao estudar a órbita de Marte e não querendo abandonar por completo a circularidade das órbitas, Kepler começa a depara-se com demasiados impasses e frustrações à sua teoria. Resolve então estudar a órbita da Terra e “transportá-la” para Marte. Fixando a Terra no céu, conseguiu determinar a distância de Marte ao Sol, chegando à conclusão de que o movimento dos planetas emanava do Sol. Esta força, segundo Kepler é proporcional à velocidade. Estas conclusões vão dar origem à segunda lei (**ver capítulo 2**).

Para explicar como o Sol poderia ter o tal aspecto motor que até então não se lhe atribuía, Kepler propõe à comunidade científica duas analogias: o Sol era considerado como uma fonte de luz; O sol era como que um íman que atrai os planetas (suportada pela obra do físico inglês William Gilbert “De magnete”, publicada em Londres em 1600).

Outra vez Galileu Galilei²⁵

Passado muito tempo sobre os seus primeiros contactos com Galileu, Kepler volta a contactá-lo quando sabe que o astrónomo pisano “descobre a luneta para observar os céus”. Sabemos que Galileu não foi o primeiro a utilizar a luneta, mas foi com certeza o primeiro a utilizá-la metódica e sistematicamente. Galileu não responde, nem comenta nenhuma das obras editadas por Kepler até então. Entretanto, em 1608 o telescópio é inventado por Johann Lippershey, o que veio abrir “novas janelas” para o céu. Em 1610, Kepler publica uma carta em defesa da obra de Galileu, com o título “Dissertatio cum nuncio sidereo” (Conversa com o mensageiro celeste), associando-se

²⁴ Citado por idem, 2003, pág. 135

²⁵ Já referido uma primeira vez na página 12, daí a escolha deste título.

a ele em defesa das suas novas ideias sobre os céus. Com esta postura Kepler retornava ao que ele sempre quis provar, a veracidade da teoria de Copérnico. Receando perder o apoio de Kepler, Galileu escreve-lhe a 19 de Agosto de 1610 (segunda e última carta de Galileu, 13 anos após a primeira), agradecendo o facto de ele ter aceite as suas descobertas como verdadeiras, destacando contudo a ignorância de ainda alguns membros da comunidade científica da época:



Figura 14 – Galileu Galilei, retrato.²⁷

“O que devemos fazer? Ri da estupidez do povo, meu Kepler... Quem me dera dispor de mais tempo para rir-me deles com você. Que gargalhadas daríamos, meu caríssimo Kepler, se ouvíssemos o que os principais filósofos de Pisa disseram ao Grão-duque contra mim...” Galileu²⁶

Embora existisse compreensão e respeito mútuo, as descobertas de Kepler foram de muito difícil aceitação, devido ao paradigma vigente do Geocentrismo,

e pelo facto da evolução para o Heliocentrismo contar com a Oposição “fervorosa e perigosa” da Igreja Católica.

As teorias, heliocêntricas e geocêntricas, coexistem num período mais ou menos longo do tempo. A ruptura final, entre os dois paradigmas, que tinha começado com Copérnico e Galileu, só se torna definitiva com os estudos de Kepler, alguns anos após a sua morte.

²⁶ Citado por ibidem, pág. 153 e 154

²⁷ Extraído de fonte: www.ualg.pt/.../historia/galileu_galilei.htm (3/2/2007)

O ano de 1611

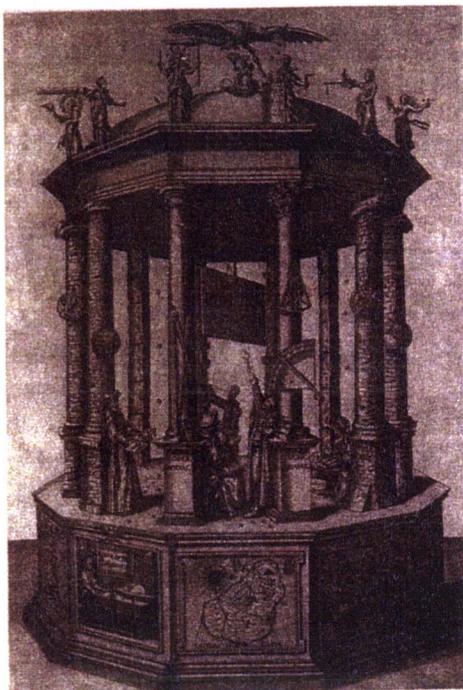
O ano de 1611 foi dramático para Kepler. A sua esposa contraiu febre húngara e epilepsia, os seus três filhos foram atingidos por varíola, tendo o preferido (Friedrich) acabado por falecer. Enquanto o desequilíbrio emocional da mãe aumentava dramaticamente, conduzindo ao seu falecimento em Julho. Kepler, totalmente destroçado e psicologicamente impedido de prosseguir os seus estudos, recebe mais um golpe, a morte de Rodolfo II. Em Janeiro de 1612, após a morte do seu protector, Kepler decide abandonar Praga e vai para Linz, capital da Áustria superior (nas margens do Danúbio) como matemático provincial. Esta decisão veio a revelar-se providencial, pois logo em seguida começou a guerra dos trinta anos (1618-1648), com a defenestação de Praga em 1618.

O segundo casamento, as Tábuas Rodolfinas e as acusações de bruxaria da sua mãe

Já há algum tempo a viver na Áustria decide procurar outra esposa, que elege entre 11 candidatas. Casa em 30 de Outubro de 1613, com Susanna Reuttinger, vinte anos mais nova. Deste casamento nascem sete filhos, dos quais quatro morrem antes dos cinco anos de idade, de tuberculose ou varíola, sobrevivendo três: Córdula, Fridmar e Hildebert. Mesmo tendo perdido quatro filhos, Kepler continuava os seus estudos de Astronomia. Além da Astronomia dedicava-se também à Cronologia (tentava calcular a data precisa do nascimento de Cristo) e, também à Matemática Aplicada. As autoridades austríacas não perceberam a importância das obras que Kepler publicou na área da Matemática e reafirmaram-lhe que tinha que trabalhar para aquilo que era pago: a construção das Tábuas Rodolfinas.

Neste período da sua vida, Kepler tem que enfrentar as acusações para com a sua mãe. Acaba por ser presa acusada de bruxaria, só não sendo condenada à fogueira devido à influência do seu filho. Algum tempo depois acaba por falecer na prisão.

Apesar destas preocupações, este período foi bastante rico do ponto de vista intelectual, escreveu um importante manual em defesa da Astronomia Copernicana, e



Copérnico e Brahe).²⁸

descobriu também a terceira lei do movimento planetário (**ver capítulo 2**), tendo ainda observado, em 1618, a passagem de um cometa (sabemos hoje que se tratava do famoso Halley). Após a destruição da Tipografia onde iria imprimir as Tábuas, Kepler foi para Ulm, na Alemanha, onde, finalmente, em 1627, consegue publicar as Tábuas Rodolfinas. Nesta obra Kepler, define as posições dos planetas tendo como base as suas leis.

Figura 15 – Frontispício das Tábuas Rodolfinas (alegoria ao templo de Urânia, no qual figuram importantes astrónomos, como

Os últimos anos

Nos últimos anos da sua vida Kepler tornou-se o astrólogo oficial de Albrecht Wallenstein, chefe de guerra, que teria sido recompensado pelas suas vitórias com o ducado de Sagan, na Silésia. No dia 15 de Novembro de 1630, Kepler morre em Regensburg, na Alemanha, durante uma viagem que tinha como objectivo receber o dinheiro que a Coroa lhe devia.

Na manhã do enterro, assistiu-se a um espectáculo celeste em sua homenagem “um eclipse lunar”. Os seus restos mortais perderam-se no cemitério destruído pela guerra dos trinta anos, restando apenas o epitáfio, que terá sido ele mesmo a escrever:

“Os céus medi, e agora meço as sombras. Meu espírito ao céu esteve sempre preso. E agora preso à terra jaz o meu corpo.” Kepler²⁹

²⁸ Extraído de Ferguson, 2002, pág. 350

²⁹ Citado por ibidem, pág. 197

Depois da sua morte, a título póstumo, o seu filho Ludwig, último filho do seu primeiro casamento, publica a sua primeira obra de ficção, na cidade de Sagan, em 1634. Nesta obra é relatada uma hipotética viagem à Lua.

Na tabela 1, apresentam-se, por ordem cronológica, alguns factos políticos, culturais, sociais e ligados à Astronomia, mais relevantes, ocorridos durante o período compreendido entre 1500 e 1650.

Tabela 1: Tábua Cronológica (1500-1650)

<i>FACTOS POLÍTICOS</i>	<i>FACTOS CULTURAIS E SOCIAIS</i>	<i>FACTOS LIGADOS À ASTRONOMIA</i>
<p>1500</p> <p>1519- Carlos V, rei de Espanha e das suas possessões ultramarinas, dos territórios herdados dos Habsburgos e das regiões da Borgonha, torna-se imperador.</p> <p>1525- Revoltas de camponeses alemães contra os seus senhores. Lutero instiga estes a reprimir os revoltosos.</p> <p>1529 – Dieta de Espira – Nesta reunião dos príncipes do Império, foi decretada a prática do luteranismo apenas nos territórios onde os príncipes a ele tivessem aderido.</p> <p>1550</p>	<p>1517- Lutero afixa as 95 teses.</p> <p>1519 – Morte de Leonardo da Vinci.</p> <p>1524/25 (?) – Nasce Luís de Camões</p> <p>1525- Por esta altura nasce a corrente artística do Maneirismo como revolta contra o equilíbrio clássico do Renascimento, também considerado uma degenerescência deste.</p> <p>1542- Restabelecimento do Tribunal do Ofício.</p> <p>1545- Início do Concílio de Trento.</p> <p>1546- Morte de Lutero.</p>	<p>1502 – Nascimento de Pedro Nunes (Alcácer do Sal).</p> <p>1529 – Pedro Nunes é nomeado Cosmógrafo do Reino.</p> <p>1537 – Pedro Nunes publica a obra <i>Tratado da Sphera com a Theoria do Sol e da Lua</i>.</p> <p>1537-1542 (?) – Pedro Nunes publica a obra <i>Astronomici Introductorii de Spaera Epitome</i>.</p> <p>1543- Nicolau Copérnico publica a obra <i>De Revolutionibus Orbium Caelestium</i>, dedicado ao Papa Paulo III.</p> <p>1546- Nascimento de Tycho Brahe.</p> <p>1547 – Pedro Nunes é nomeado Cosmógrafo-Mor do Reino.</p>

<p>1555- Paz de Augsburg- Liberdade de religião para os príncipes e cavaleiros do Império de Carlos V, consolidando algumas tréguas nas guerras da Religião.</p> <p>1558- Resignação de Carlos V e divisão do seu império pelos filhos. O seu filho Fernando torna-se imperador alemão.</p> <p>1588- Morte de Frederico II da Dinamarca e subida ao trono de Cristiano IV.</p>	<p>1564- A Igreja Católica cria uma das armas da Contra Reforma: o Índice.</p> <p>1572- Noite de S, Bartolomeu – massacre dos huguenotes (protestantes franceses). 1572 - Publicação dos Lusíadas</p> <p>1580- Morre Luís de Camões 1582- Introdução do calendário gregoriano.</p> <p>1596 – Nasce René Descartes</p>	<p>1560- Registado um eclipse parcial do sol.</p> <p>1563- Registo de conjunção de Júpiter com Saturno. 1564- Nascimento de Galileu Galilei.</p> <p>1571- Nascimento de Johannes Kepler. 1571 – Pedro Nunes publica a obra <i>De Crepusculis Liber unus</i>. 1572- Descoberta da stella nova na constelação de Cassiopeia.</p> <p>1573- Passagem de cometa.</p> <p>1578 – Morre Pedro Nunes (Coimbra).</p> <p>1588 – Tycho Brahe publica a obra <i>Mundi Aetherei Recentioribus</i>. 1589- Kepler ingressa na Universidade de Tuebingen onde é aluno de Michel Maestrin (um geocentrista).</p> <p>1594- Ingressa como professor no seminário protestante de Graz onde se dedica ao ensino e à astronomia, destacando-se contudo, como calendarista.</p> <p>1596- Foi publicado o primeiro trabalho de Kepler com o título de <i>Mysterium Cosmographicum</i>, onde é autorizado a tratar a teoria de heliocêntrica como hipótese matemática. Deste trabalho enviou exemplares a Brahe e Galileu. 1597- Conhece e casa com Bárbara Muller. Deste casamento nasceram 6 filhos, apenas dois (Friedrich e Ludwig) chegaram à idade adulta. 1598 – Brahe publica <i>Astronomiae Instauratae Mechanica</i>.</p>
--	---	---

<p>1600</p> <p>1612- Morte de Rudolfo II da Boémia.</p> <p>1618 – Início da guerra dos 30 Anos que opôs a Espanha-Áustria aos estados protestantes. Defenestração de Praga (sublevação em consequência da violação da carta imperial).</p> <p>1650</p>	<p>1600 –Giordano Bruno, defensor das ideias de Copérnico e Tycho Brahe é condenado à morte e queimado vivo em Roma.</p> <p>1610 – Galileu constrói o seu primeiro telescópio.</p> <p>1616- Inclusão da obra <i>De Revolutionibus Orbium Caelestium</i> no Index 1616- Início do julgamento de Galileu</p> <p>1620 – Prisão e posterior libertação da mãe de Kepler, acusada de bruxaria. 1621 – Morte da mãe de Kepler.</p> <p>1626 – Destruição da gráfica onde Kepler tentava imprimir as “Tábuas Rodolfinas”.</p>	<p>1600- Encontro de Kepler com Brahe.</p> <p>1601-Morte de Tycho Brahe. 1601- Kepler é nomeado matemático imperial pelo rei Rodolfo II da Boémia.</p> <p>1609 – Kepler publica a obra “Astronomia Nova”, onde refere as suas duas primeiras leis do movimento dos planetas.</p> <p>1612- Kepler é nomeado matemático imperial em Linz. 1613- Kepler casa pela segunda vez.</p> <p>1618 – Kepler abandona Praga. 1618 – Kepler descobre a terceira lei.</p> <p>1627 – Impressão das “Tábuas Rodolfinas.</p> <p>1630- Morte de Kepler.</p> <p>1642 – Morte de Galileu Galilei</p>
--	---	--

Conclusão

Como conclusão deste capítulo será importante referir que após os estudos de Kepler, o céu começou a ser visto com “outros olhos”. Durante quase toda a sua vida vigora o paradigma Geocêntrico, embora Copérnico e Galileu, o tenham feito “tremar”. Existem outros contemporâneos, vindos de outras “ciências” que, também começam a desacreditar o Geocentrismo, como por exemplo, William Shakespeare (1564-1616), numa de suas obras literárias (Hamlet falando para Ofélia):

“Doubt thou the stars are fire;
Doubt than the sun doth move;
Doubt truth to be a liar;
But never doubt I love.” Shakespeare³⁰

Também em Portugal são editados, nesta época (ver tabela 1) os Lusíadas de Luís de Camões que também abordam grandemente a questão das observações celestes. Camões foca muito o sistema ptolomaico, pois só nesta época é que noutras zonas da Europa se começava a defender, ainda que de modo pouco claro, o sistema de Copérnico. Porém Camões descreve já a necessidade das observações constantes dos Céus para podermos perceber de que se trata.

Constatamos também que, durante toda a sua vida, não foi nada fácil, parece terem existido coincidências quase “divinas” que o fizeram deambular pela Europa e que essas deambulações foram, quase sempre motivos de sucesso e novas hipóteses para voltar a estudar e tentar provar o que tinha proposto ainda bem novo, pouco depois de sair de Tuebingen.

³⁰ Citado por Balibar, 1984, pág. 79

Tradução: "Duvida que as estrelas sejam fogo;
Duvida que o sol se mova;
Duvida da verdade e da mentira;
Mas nunca duvides que eu amo."

Kepler desde muito cedo sabia o que queria provar, e a sua vida pautou-se por uma busca incessante, no meio de conflitos sociais e políticos, onde ele passou de protegido a perseguido, mas estes factos nunca o afastaram dos seus objectivos.

Parece-nos também importante realçar que, como ele considerava Deus um excelente “Geómetra”, e na altura ainda não haveria toda a matemática de suporte às suas equações, ele consegue chegar à órbita de Marte através da Geometria e não utilizando os seus exaustivos cálculos matemáticos.

Capítulo 2

As Leis de Kepler (1605-1618)

Introdução

Neste capítulo tentaremos explicar como Johannes Kepler chegou à escrita das suas famosas leis. Vamos concentrar-nos nestes treze anos da sua vida, sem dúvida os mais produtivos do ponto de vista das publicações. Mais uma vez e na mesma óptica do primeiro capítulo, tentaremos contextualizar todas as emoções políticas, sociais, religiosas e económicas que se viviam nesta época e que, de uma maneira ou de outra, influenciaram e “ajudaram” a que estas leis fossem descobertas e escritas.

Cita-se o envolvimento de Kepler com Brahe, quanto a nós, a “verdadeira fonte” de inspiração e de talento para as descobertas de Kepler. Parece-nos importante realçar que, estas leis surgem da necessidade de Kepler provar a sua teoria e fazer com que ela seja aceite pela comunidade científica e, em particular por Galileu Galilei. Este mostrou-se sempre contra a elipse de Kepler, pois para ele a circunferência é que representava a pureza, logo Deus deveria ter construído o Universo à semelhança dessa pureza.



Kepler também quer provar que o Universo funciona tal como os mecanismos dos relógios, que tudo seria circular e, não apenas por ordem e desejo do Divino. Para isso ele não faz economia do erro, conta como tudo foi feito e descoberto, procurando que os factos se ajustassem à teoria. Neste contexto ele já dá bastante importância à história dos factos. O que não funciona tem que ser “abandonado”, o círculo não servia, teria que aparecer outra figura.

Figura 16 – Relógio da Torre da Igreja de Vila Nova de Mil Fontes (destaque do relógio e da forma circular).³¹

³¹ Extraído de www.milfontes.net/images/relogio_igreja.jpg (3/2/2007)

As observações de Marte

A maior parte dos dados observados e registados por Brahe e pelo seu assistente Longomontanus (Christian Severinus; 1562-1647) referiam-se ao planeta Marte. Quando Kepler começou as suas observações, Tycho pediu-lhe para se dedicar a Marte, passando o seu assistente a observar intensamente a Lua. Este pedido de Brahe e a pronta aceitação por Kepler irão marcar para sempre a História da Astronomia.

Kepler começa a observar Marte e afirma a Brahe que resolverá o problema da órbita deste planeta em oito dias, o que não acontece. Brahe, entretanto adoece e morre pouco depois, e os oito dias a que Kepler se referiu durariam oito anos. Durante todo este tempo Kepler percebe que a órbita do planeta não pode ser circular (perfeição já defendida por Aristóteles e que nesta altura ainda é defendida pela Igreja e pelo próprio Galileu), e tenta então realizar cálculos admitindo que a órbita seria oval. Quando o círculo é abandonado, Kepler encontra-se na terra de ninguém. É difícil agora chegar a outra forma geométrica, porquê privilegiar uma em relação a qualquer outra. Rapidamente se apercebe que a forma oval também teria que ser rejeitada. Os seus cálculos e observações permitem-lhe admitir a elipse, como a forma mais aproximada da órbita de Marte. Esta proposição causa-lhe muitíssimas preocupações, pois punha em causa toda a sua educação religiosa, bem como as suas crenças. Kepler introduz então a causalidade física na geometria formal dos céus. O Universo terá de ser mais físico-geométrico.

A transversalidade do meio sociocultural e científico

Convém referir que em termos filosóficos e teológicos este seu avanço iria merecer críticas em todo o “mundo científico”, uma vez que o círculo ainda era aceite como sinónimo da perfeição do Criador.

Galileu opõe-se arduamente a esta forma e discorda integralmente da proposta de Kepler. Talvez no seu íntimo ele quisesse aceitar, mas a sua educação teológica levava-o a recusar a proposta até aos limites. Além disso tinha sido educado segundo uma cultura Renascentista, onde o que era belo e puro imperava. Onde as formas

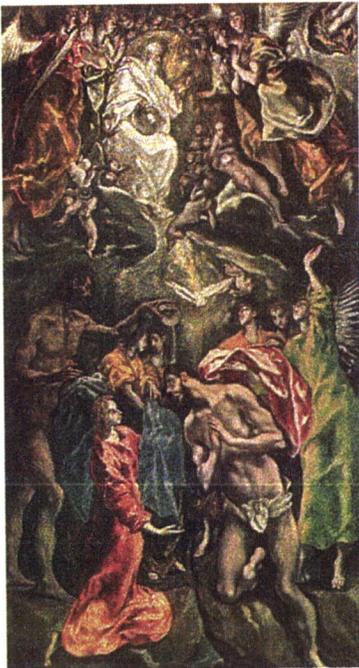
perfeitas, o círculo, o triângulo, o quadrado, eram a representação arquitectónica preferida.



Figura 17 – Última Ceia, Leonardo da Vinci, 1495-1498.³²

Kepler, Galileu e outros, consideravam o círculo como a figura pura, e isso tornava inaceitável que as órbitas celestes fossem não circulares. Galileu opunha-se ainda mais a esta preferência de Kepler, porque associava a elipse a uma corrente “contra” o Renascimento, o

Maneirismo, com a qual Galileu discordava.



O Maneirismo surge para se opor à perfeição do Renascimento e abrange áreas como a escultura e a pintura, a literatura e em última análise a maneira de pensar dos séculos XVI e XVII. Caracteriza-se pelo alongamento, estilização e deformação das formas “puras”, uma mistura entre o rectilíneo e o curvilíneo, o gesto (movimento) é muito marcado. Um dos representantes do Maneirismo na pintura foi El Greco, do qual se insere a pintura “Baptismo de Cristo”, que existe no Hospital Tavera em Toledo, Espanha. Analisando as duas pinturas conseguimos ver as principais diferenças entre um e outro movimentos.

Figura 18 – Pintura de El Greco. Baptismo de Cristo.³³

Na figura 15, tudo é harmonioso e perfeito, enquanto na figura 16, já se verificam algumas alterações de forma, como é bem visível nos contornos das pernas e dos braços

³² Extraído de www.casalperfeito.com.br/fotos/davinci1.jpg (3/2/2007)

³³ Extraído de Grande Enciclopédia Universal, 2004, volume 13, pág 8314

de Jesus Cristo. Importa realçar que o Maneirismo foi sempre encarado como uma corrente “marginal” e era assim que Galileu considerava a “elipse de Kepler”.

O “saber estar” de Galileu

Podemos considerar “estranho” este comportamento, uma vez que aquando das suas observações das manchas solares em 1611, o próprio Galileu escreveu o seguinte:

Nada prova dizer... que é inverosímil existirem manchas escuras no Sol porque ele é o corpo mais lícido. Enquanto os homens foram obrigados a chamar ao Sol “o mais puro e mais lícido”, eles não viram qualquer sombra ou impureza; mas agora que o Sol se nos revela parcialmente impuro e com manchas, porque razão não lhe devemos chamar “manchado e não puro?” Pois os nomes e os atributos devem acomodar-se à essência das coisas, e não a essência aos nomes, dado que as coisas vêm primeiro e os nomes depois. Galileu³⁴

Porque seria então Galileu tão renitente a aceitar a “deformação” do círculo para a elipse, quando parecia aceitar tão bem a “não pureza” do Sol? Os escritos históricos não são muito claros, mas achamos que a resposta deve ser procurada na forma como Galileu viveu. O sábio pizano foi um homem do seu tempo que, sabia o que podia e não podia dizer, e até como o devia fazer. Tendo em conta a ausência de liberdade intelectual orientada pela matriz imposta pela Igreja Católica, Galileu defende de forma pouco clara, o sistema de Nicolau Copérnico. Esta situação deve-se ao clima de medo instaurado pelos órgãos repressivos, nomeadamente o Índex e a Inquisição, De forma a simplificar as coisas da Natureza, Galileu aceita que seja a Terra a mover-se e não pelo facto de exacta ser igual a qualquer outro planeta:

Presentemente, se, para obter o mesmo efeito exactamente, tanto faz que só a Terra se mova enquanto todo o universo está parado, ou que só a Terra esteja imóvel enquanto todo o universo é animado do mesmo movimento, quem quererá acreditar que a natureza (que, na opinião de todos, não actua através de um grande número de coisas, quando tem a possibilidade de o fazer com poucas) tenha escolhido fazer moverem-se um número imenso de corpos muito vastos, e a uma

³⁴ Citado por, Shapin, 1999, pág. 39

velocidade inestimável, para alcançar o resultado que poderia ser obtido graças ao movimento de um só corpo em torno do seu próprio centro? Galileu³⁵

A segunda lei

Retomando o seu estudo da órbita de Marte, verificamos que Kepler consegue inovar de três modos diferentes, que irão ser cruciais na tentativa de abandonar de vez a teoria ptolomaica. Estas três inovações são: i) deslocamento do centro do sistema solar para o Sol; ii) descrição das órbitas dos planetas aproximadamente no mesmo plano, sem “oscilarem” no espaço; iii) não uniformidade do movimento dos planetas. Estas inovações vieram clarificar a teoria de Copérnico e permitiram entender com mais alguma facilidade o movimento planetário. Podemos verificar essa simplificação do sistema nas palavras de Ronaldo Mourão:

Antes das ideias de Kepler para explicar o movimento de Marte eram necessários no mínimo cinco epiciclos ou rodas auxiliares, após as suas ideias, bastava um único círculo excêntrico, se considerada a sua órbita como circular.³⁶

Embora Kepler tenha conseguido inovar, também se considera um fracasso já que ao fim de dez longos anos de cálculos, uma discrepância de oito minutos de arco entre o modelo e os seus cálculos matemáticos, foi obtida relativamente à órbita de Marte. Admitindo que Brahe era exímio nas suas observações, embora esta discrepância fosse muito menor do que qualquer outra obtida até então, Kepler acha que deve recusar o seu trabalho e dirigi-lo noutra direcção:

“Visto que a vontade divina nos legou na pessoa de Tycho Brahe um observador esmeradíssimo, mediante cujas observações o erro do cálculo de Ptolomeu se revelou por um valor de 8', é justo que, com um ânimo cheio de gratidão, aceitemos e reconheçamos este benefício de Deus. Procuramos, pois, esforçar-nos, apoiados pelos argumentos acerca da inexactidão das hipóteses feitas, por indagar finalmente a forma autêntica dos movimentos celestes. No que se vai seguir, irei eu próprio percorrer este caminho, segundo o meu método... Este simples

³⁵ Citado por Balibar, 1984, pág. 48 e 49

³⁶ Texto adaptado e alterado de Mourão, 2003, pág 119

8' revelaram, de facto, a via para a renovação de toda a astronomia; tornaram-se o material da construção de uma grande parte desta obra” Kepler³⁷

Ainda com alguns receios de abandonar o movimento circular, Kepler continua a analisar a órbita de Marte em vão. Decide então abandonar as ideias preconcebidas para a forma das órbitas e começar do princípio. Começa também a estudar o movimento da Terra em torno do Sol e abandona, por enquanto, os estudos sobre a órbita de Marte. Kepler fixa a órbita terrestre no céu e “transporta-a” para Marte, determinando então a distância de Marte ao Sol. Pelos seus cálculos, e usando também as observações minuciosas de Brahe, chega à conclusão que teria que ser do Sol que emanaria a força responsável pelo movimento planetário. Como comprovou que a Terra não se deslocava com velocidade uniforme e que essa velocidade dependia da distância ao Sol, conclui que o tempo necessário para varrer uma área de órbita deveria ser sempre proporcional à mesma distância. Além de afirmar isto para o planeta Terra, ele confirma que o mesmo se passa com os outros planetas, conhecidos na altura. Importa referir que esta conclusão brilhante vem posteriormente a confirmar-se, com Isaac Newton (1642-1727) e sabe-se que nos nossos dias vigora para todos os planetas já descobertos, bem como para outros astros que orbitam em torno de qualquer outro. Com estas observações e cálculos surge o enunciado da segunda lei, em 1609:

*“O vector posição do planeta (com origem no Sol e extremidade no planeta) varre áreas iguais em tempos iguais”.*³⁸

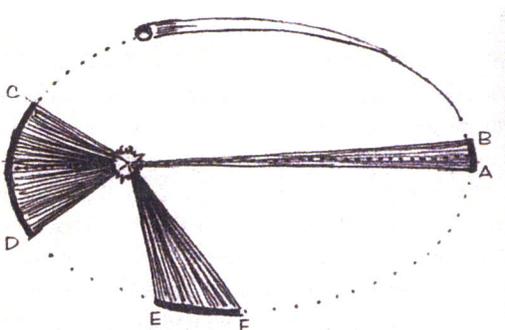


Figura 19 – Segunda Lei de Kepler.³⁹

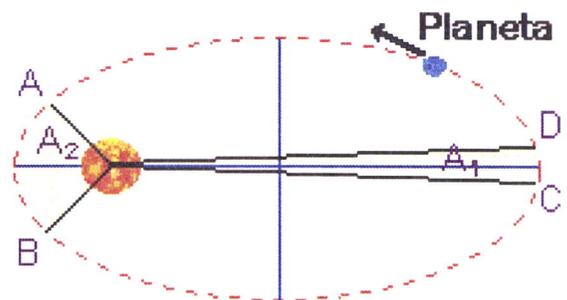


Figura 19 A – Segunda Lei de Kepler (representação recente)⁴⁰

³⁷ Citado por Huebner, 1986, pág. 65

³⁸ Adaptado dos Apontamentos de Mecânica Teórica, Miguel Araújo, 2003, Universidade de Évora

³⁹ Extraído de Mourão, 2003, pág. 124

⁴⁰ Retirada de educar.sc.usp.br/licenciatura/2000/gravitacao/leisdeKepler.htm (3/2/07)

Kepler é levado ao sucesso pelo estabelecimento da segunda lei. Esta é deduzida antes da primeira, por ter verificado que as velocidades da Terra no afélio e no periélio são inversamente proporcionais às respectivas velocidades desses pontos ao Sol.

Kepler não fez mais do que combinar duas leis falsas (a força é inversamente proporcional à distância e a força é directamente proporcional à velocidade) para chegar a um resultado correcto. Embora Kepler tenha partido de uma interpretação a nível teórico não exacta, ele chega a uma observação (constatação) exacta.

A primeira lei

Depois de determinar as variações da velocidade dos planetas Terra e Marte ao longo das suas órbitas, era então essencial averiguar qual era afinal a forma da própria órbita. Mais uma vez vai socorrer-se das observações de anos e anos do planeta Marte e também dos registos escritos de Ptolomeu, Copérnico e Brahe. Percebe então que a circularidade defendida até então, tinha que ser abandonada. Abandona então o círculo ptolomaico, e apercebe-se que a ovalização da trajectória proposta por Copérnico e por Brahe também não serviria para confirmar as suas novas descobertas. As suas crenças religiosas, por outro lado, prendiam-no ao modelo circular. Por isso, fez cálculos e cálculos durante mais três anos, findos os quais anuncia que a órbita de Marte terá de ser uma figura oval e não um círculo. Continua os cálculos para chegar à forma ovalada pretendida, incrivelmente usa elipses nos cálculos auxiliares, nunca lhe dando o “clic” que seria essa a forma da órbita que tanto procurava.

Com a sua astúcia e dedicação extrema para provar que o que tinha afirmado muitos anos antes estaria correcto, continuou a embrenhar-se em todos os tipos de observações, registos e cálculos para chegar à órbita pretendida. Kepler chega a uma conclusão que lhe permite quase visualizar a sua órbita, para a qual ainda não tem nome:

“... comecei por pensar por que uma lúnula tão espessa... Enquanto me dedicava a uma meditação escrupulosa [sobre a questão], considerava e voltava a considerar que nada tinha conseguido, como havia afirmado no capítulo quinquagésimo quinto, o meu triunfo com relação à órbita de Marte parecia ter sido

inútil, [quando] por acaso, caí fortuitamente na secante do ângulo $5^{\circ} 18'$, que media o ângulo óptico máximo... Ao descobrir que a secante era igual a 1,00429, foi como se tivesse acordado de um sono, contemplava uma nova luz e começava a raciocinar [de uma nova maneira] também”. Kepler⁴¹

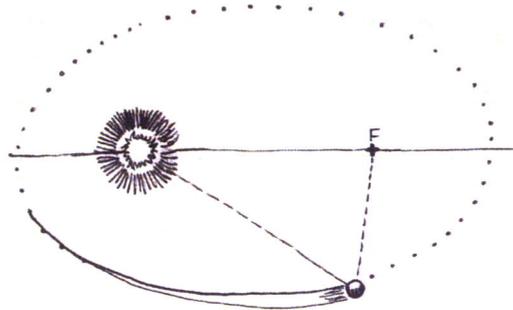


Figura 20 – Primeira Lei de Kepler.⁴²

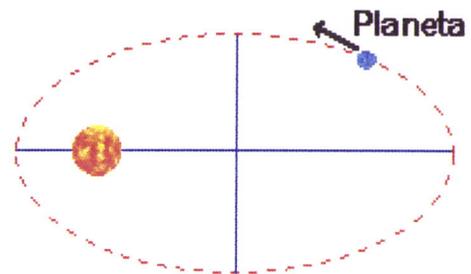


Figura 20 A – Primeira Lei de Kepler (representação recente)⁴³

Não sendo capaz de interpretar a equação encontrada decide abandoná-la e tentar chegar à órbita pelo método geométrico, o qual lhe permite concluir que a órbita de Marte seria uma elipse e que o Sol ocuparia um dos focos.

Mais uma vez achou que se Marte tinha uma órbita elíptica, também os outros planetas a teriam. Enuncia então a sua primeira lei do movimento planetário:

*“A órbita de um planeta é uma elipse estando o Sol situado num dos focos”.*⁴⁴

⁴¹ Citado por Mourão, 2003, pág. 128

⁴² Extraído Mourão, 2003, pág. 129

⁴³ Retirada de educar.sc.usp.br/licenciatura/2000/gravitacao/leisdeKepler.htm (3/2/07)

⁴⁴ Adaptado dos Apontamentos de Mecânica Teórica, Miguel Araújo, 2003, Universidade de Évora

A resolução de problemas práticos

Após a formulação das suas primeira e segunda leis, Kepler continua a investigar o que se propõe e a escrever e publicar obras. Analisando e estudando a Geometria de Arquimedes, para a resolução de um problema prático (como medir o volume dos tonéis onde se guardava o vinho, cujas formas eram as mais diversas), ele publica então alguns pequenos tratados sobre matemática, desenvolvendo um método muito original para o cálculo dos volumes, que hoje pensa-se que terá sido o “florescer” do cálculo infinitesimal.

Devido à observação dos cometas em 1618, publica também artigos sobre estes misteriosos corpos celestes, onde fala do cometa que apareceu em 1607 (sabemos hoje que se tratava do cometa Halley), concluindo que as órbitas dos cometas eram rectilíneas. Devido às observações de Kirch, só em 1680, Newton refere que essas órbitas seriam parabólicas, ocupando o Sol um dos focos. Só em 1705 é que se prova que a órbita dos cometas também é elíptica, graças aos estudos do astrónomo inglês Edmond Halley (1650-1742), pelas suas observações e conclusões sobre um cometa em 1680, mais tarde chamado de cometa Halley.

Embora já tendo descoberto a elipse, Kepler nunca se separa da ideia de que Deus terá criado o mundo à sua imagem e que essa só pode ser esférica, símbolo geométrico da Trindade. Nesta perspectiva ele escreve o “*Harmonice Mundi*”, onde tenta conjugar a Geometria, a Música, a Astrologia e a Astronomia, e abordá-las tendo como fio condutor a ideia de “harmonia”. Na introdução desta obra refere-se a conceitos harmónicos de Pitágoras e também ao enorme contributo dado por Ptolomeu, 1500 anos antes do seu nascimento, para a época das observações astronómicas.

A terceira lei

Todos estes pensadores, mais os seus contemporâneos, essencialmente Copérnico, Brahe e Galileu, e a sua avidez por tentar provar ao que se dedicara toda a vida, obrigam-no a ir em frente, como ele próprio escreve reforçando as suas ideias:

“O que me despertou há vinte e cinco anos, antes mesmo de haver descoberto os cinco corpos regulares entre as órbitas celestes...; que, há dezasseis anos, anunciei ser o alvo final de toda a pesquisa; que me levou a dedicar a os melhores anos da vida aos estudos astronómicos, a me associar a Tycho Brahe, a aceitar Praga como minha residência, com a ajuda de Deus, que me entusiasmou e me despertou irreprimível desejo, (...) Assim depois de ter visto o primeiro raio da aurora há dezoito meses, a luz do dia há três meses, finalmente há alguns dias o Sol de minha admirável contemplação me ilumina e nada me deterá. Estou livre para entregar-me ao sagrado delírio. Livre para gritar para todos os mortais confessando com franqueza que roubei os vasos de ouro dos Egípcios para com eles construir um tabernáculo para o meu Deus, (...)” Kepler⁴⁵

A minha obra pode esperar cem anos por um leitor, se Deus, ele próprio, teve paciência de esperar seis mil para encontrar quem contemplasse a Sua obra (obra da Criação).⁴⁶

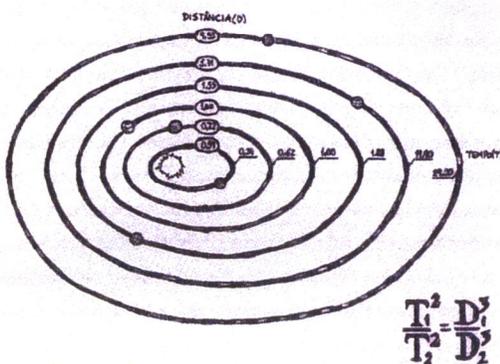


Figura 21 – Terceira Lei de Kepler.⁴⁷



Figura 21 A – Terceira Lei de Kepler (representação recente)⁴⁸

Ele prossegue os seus estudos com grandes problemas ético-religiosos levantados pela descoberta de um Universo de obras elípticas e movimentos não uniformes em contradição com todas as harmonias e as formas perfeitas criadas por Deus, nas quais não queria deixar de acreditar.

⁴⁵ Citado por Mourão, 2003, pág. 171

⁴⁶ Texto adaptado e alterado de idem, pág. 172

⁴⁷ Extraído de ibidem, pág. 175

⁴⁸ Retirado de www.geocities.com/CapeCanaveral/Hall/1018/fisica.html (3/2/07)

Começa então por admitir novas hipóteses, tais como, períodos de revolução dos planetas durante os quais teriam relações harmónicas; relações de harmonia entre tamanho e volume dos vários planetas; escala harmónica para definir maior ou menor distância entre os planetas; ajustamentos de velocidades extremas dos planetas. Todas estas hipóteses se viriam a revelar enormes fracassos.

Após todos os fracassos, tenta transferir a posição do observador para o centro do Universo, onde vai calcular as variações da velocidade angular, não considerando a distância do planeta ao Sol, percebe então que os resultados também não o levam a nenhum lado. Com o seu espírito pragmático tenta então aproveitar os cálculos e analisá-los partindo de outra premissa: comparar as velocidades angulares extremas de pares de diferentes planetas – chegando a resultados notáveis. Sobre o facto Kepler escreve o seguinte:

Os movimentos celestes nada mais são do que um canto contínuo de várias vozes (imperceptíveis pelo ouvido, mas perceptíveis pela inteligência); uma música que, através de sons discordantes, através de síncopes e cadências por assim dizer (como os homens se empregam na imitação de tais discordâncias naturais), progride para certas clausuras planejadas de antemão, quase de seis vozes, e com isso estabelece marcos no imensurável curso do tempo. Logo, já não surpreende que o homem, imitando o Criador, tenha finalmente descoberto a arte do canto figurado, desconhecida dos antigos. O homem precisava reproduzir a continuidade do tempo cósmico na duração de uma breve hora por uma artística sinfonia para várias vozes, a fim de obter uma amostra do deleite do Divino Criador nas suas obras, e participar no júbilo fazendo música à imitação de Deus.” Kepler⁴⁹

Após estas conclusões consegue por fim, em 1618, enunciar a sua terceira lei do movimento dos planetas:

*“O quadrado do tempo de revolução do planeta em torno do Sol é directamente proporcional ao cubo do comprimento do semi-eixo maior da sua órbita.”*⁵⁰

⁴⁹ Citado por Mourão, 2003, pág. 174 e 175

⁵⁰ Adaptado dos Apontamentos de Mecânica Teórica, Miguel Araújo, 2003, Universidade de Évora

Ao longo das suas pesquisas e de todo o seu percurso intelectual, Kepler enuncia as três Leis do Movimento dos Planetas, e sempre na pretensão de relacionar todas as suas descobertas com os seus “delírios” e pensamentos mais místicos. Fica-nos a sensação que o próprio não se apercebeu, da real importância desta descoberta. Só alguns anos mais tarde, Newton é peremptório em afirmar que na teoria de Kepler estava “impregnada” toda a essência da Lei da Gravitação Universal.

Conclusão

Em jeito de conclusão podemos referir que no seu tempo não é dado a Kepler o real valor e a sociedade da altura parece não se aperceber da transição importantíssima entre paradigmas.

O Heliocentrismo torna-se então Paradigma dominante com Johannes Kepler. Kepler esclarece a comunidade que o seu objectivo, enquanto estudioso, era provar o mecanismo de relógio existente no Universo e não olhá-lo mais como organismo divino. Após longos e sofridos anos de estudo propôs três leis, cujo conteúdo é aqui reforçado por Einstein:

“As leis empíricas de Kepler, leis que concernem o movimento dos planetas, deduzidas das observações de Tycho Brahe, não podiam ficar sem explicação. Todos sabem hoje como Kepler conseguiu encontrar tais leis, no termo de um trabalho de beneditino, a partir das trajectórias determinadas de maneira empírica. Insiste-se menos, no entanto, no carácter genial do método utilizado por Kepler para determinar as trajectórias reais a partir das trajectórias aparentes (as que se observam da Terra). Einstein⁵¹

Do ponto de vista estritamente científico, Kepler é sem dúvida o primeiro espírito do seu tempo. Kepler une a algum génio matemático uma excelente visão de pensamento para além da época em que viveu, e abre definitivamente as portas a uma nova Astronomia. É incrível porém, que em termos filosóficos ele esteja bem mais

⁵¹ Citado por Balibar, 1984, pág. 80

“colado” a Aristóteles, do que aos seus contemporâneos Galileu ou Descartes; uma vez que, para Kepler o movimento e o repouso são “entes” completamente antagônicos.

Capítulo 3

O Estado da Arte

Introdução

Importa desde já referir que, embora se encontrem bastantes trabalhos publicados sobre Kepler e as suas leis, o número de trabalhos que encontrámos com uma abordagem didáctico-pedagógica do assunto é muito reduzido.

Em termos de teses, encontrámos apenas uma que, já data da década de 80, publicada no Brasil, com o intuito de compreender o Sistema Solar de forma crescente desde o pré-escolar até ao vestibular (Neves, 1986).

Quanto a artigos publicados seleccionámos alguns, mas a maior parte referem-se apenas à terceira lei, e são muito aprofundados para os níveis de ensino que o nosso trabalho tenta incidir. Estes artigos aparecem dos mais variados locais do globo, tais como, Estados Unidos, Rússia, México, Alemanha e Reino Unido. Estes, em termos cronológicos, estendem-se desde 1991 até 2003 (Topper, 1991; Bridges, 1995; Noll, 1996; Bucher, 1998; González-Villanueva, 1998; Noll, 2002; Butikov, 2003; Romanovskis, 2004). Os artigos referenciados pertencem a três revistas diferentes: “European Journal of Physics”; “Physics Education” e “The Physics Teacher”.

Verificámos também a existência de um trabalho de uma disciplina do 1º ano Curricular do Mestrado em Estudos da Criança ministrado na Universidade do Minho, (Topa, 2004). Este trabalho possui indicações extremamente interessantes para abordar o tema, por exemplo, em Área de Projecto no Terceiro Ciclo do Ensino Básico.

De referir também que existem um elevado número de sites de várias instituições com simulações gráficas das leis de Kepler, algumas serão referenciadas ao longo do capítulo 4.

Em termos estruturais os artigos e trabalhos aparecerão por ordem cronológica da sua execução e/ou publicação. Por uma questão de método e pelo facto de o mesmo não ser um trabalho com as características dos anteriores, mas sim um programa para computador, este será focado apenas no final do capítulo. O programa Kepler (Fiolhais,

et al, 1993) para computador está elaborado para poder ser utilizado nos programas quer de Ensino Básico, quer de Ensino Secundário.

Tentaremos pois, neste capítulo reproduzir uma nossa perspectiva do que se fez até então no âmbito do ensino das leis de Kepler.

Revisão da Literatura

Astronomia de Régua e Compasso: de Kepler a Ptolomeu (Neves, 1986)

Em 1986 foi publicada por Marcos César Danhoni Neves na Universidade de Campinas no Brasil, uma tese intitulada “Astronomia de Régua e Compasso: de Kepler a Ptolomeu”.

Na tese atrás referida o autor tentam explicar como é que se podem determinar órbitas de forma bastante simples utilizando apenas régua e compasso. Determinam por este método a órbita do cometa Halley. Explica também como determinar as órbitas planetárias, através de um método aproximado utilizando para isso as primeira e segunda leis de Kepler. Tenta de uma forma mais ou menos clara desmistificar a linguagem complexa da astronomia para que qualquer aluno no início do estudo destes assuntos os consiga assimilar de forma mais fácil. A inversão do título “... de Kepler a Ptolomeu” tem para ele um sentido que consideramos bastante pedagógico. Embora Ptolomeu tenha defendido um outro paradigma e Kepler se poder considerar um dos cientistas que o quebrou e levou à existência de outro, o autor defende que os “erros” históricos e científicos de Ptolomeu foram essenciais para o avanço de conhecimentos de Kepler. Tal como nós, também este autor considera que a ciência se faz de forma evolutiva. Nunca podemos considerar que pelo facto de uma teoria vir posteriormente a ser considerada um erro, o seu autor é menos capaz do que o autor que a veio negar. Todos os contributos históricos são de extrema importância e dêem ser abordados explorando correctamente os contextos políticos, económicos e sociais da época.

A outra “lei” de Kepler para o movimento dos planetas (Topper, 1991)

Topper (1991) explica-nos que no século XVII, existiu uma outra lei suplementar à primeira lei de Kepler. Esta lei pode facilmente ser explicada aos estudantes de física, e diz-nos que os planetas se movem em torno do foco não ocupado sempre com movimento angular uniforme. Em termos geométricos esta surge mais uma

vez com base no equante, que tinha surgido no “Almagest” de Ptolomeu e que Copérnico mais tarde tinha abandonado. Kepler, antes de ter descoberto a elipse, voltou a introduzir o equante para determinar as órbitas planetárias.

Como determinar as órbitas das luas de Júpiter através de simulação computacional (Bridges, 1995)

Bridges (1995) descreve como se deduzem parâmetros orbitais a partir da observação astronómica de posições de planetas entre as estrelas. Este artigo explica como esta simulação pode ser utilizada para as luas de Júpiter usando um pequeno telescópio. Esta simulação permite observar a terceira lei de Kepler e ainda deduzir a massa de Júpiter como uma fracção da massa do Sol.

A terceira lei de Kepler para as órbitas elípticas (Noll, 1996)

Quando se estuda Física nos últimos anos do Ensino Secundário e nos primeiros da Universidade deriva as leis de Kepler para órbitas circulares e depois generaliza este caso especial da terceira lei para órbitas elípticas. Isto pode ser conseguido sugerindo que a terceira lei para órbitas elípticas pode ser obtida substituindo o semi-eixo maior da elipse pelo raio do círculo das órbitas circulares. Isto faz-se porque as órbitas circulares são quase inexistentes no nosso Sistema Solar, o que predomina são as órbitas elípticas. O estudo de Noll (1996) explica como derivar a terceira lei de Kepler para órbitas elípticas partindo apenas de conhecimentos sobre momento angular e conservação de energia por parte dos estudantes.

Terceira lei de Kepler: volumes iguais em intervalos de tempo igual (Bucher, 1998)

No seu estudo, Bucher (1998) discute o facto de os estudantes terem mais facilidade em assimilar as primeira e segunda leis de Kepler, devido ao facto da representação matemática ser facilmente reprodutível de forma gráfica. Entende o autor que a representação gráfica será essencial para a perfeita compreensão destas leis. Propõe-nos uma representação gráfica da terceira lei utilizando volumes, em vez de áreas, em ordem ao tempo. Explora esta situação com alunos e surpreende-se com o facto da maioria dos visados conseguir de forma cada vez mais fácil compreender também a terceira lei.

Das órbitas circulares às elípticas: uma aproximação geométrica do movimento de Kepler (González-Villanueva, 1998)

González-Villanueva (1998) refere que a órbita traçada pelo vector velocidade de um corpo em movimento, introduzida pelo matemático Hamilton em 1846 é um método alternativo para estudar alguns problemas de dinâmica. O artigo explica como chegar às órbitas elípticas partindo da órbita circular de Kepler. Ao longo do artigo vai sendo explicado passo a passo a evolução da órbita circular para a elíptica apenas com noções de geometria rudimentar. O autor refere mesmo que para o fazer basta ter a mão certa e utilizar correctamente o compasso.

O ensino das leis de Kepler é mais do que conhecimento empírico (Noll, 2002)

Noll (2002) tenta explicar que ensinar as leis de Kepler é muito mais do que colocar os alunos a enunciá-las.

Numa primeira parte do artigo o autor enquadra historicamente o aparecimento das leis e a queda do paradigma geocêntrico. Na sua opinião, que nos parece consensual, este paradigma começa a “tremar” com Copérnico, mas são as obras de Kepler, “Astronomia Nova”, e de Galileu, “Sidereus Nuncius”, publicadas em apenas um ano que “abanam” de vez a estrutura do paradigma anterior. Setenta e sete anos mais tarde é dado o “golpe final” com a publicação dos “Principia” de Newton. Entramos definitivamente no paradigma heliocêntrico.

O autor pensa que é necessário repensar o ensino destas leis. Considera que muita vez se cai no exagero de pensar que só se podem ensinar com cálculos matemáticos complexos, o que por si só faz com que os alunos à partida já não queiram entender. Refere também o facto da maioria dos manuais referir as leis como situações empíricas da natureza, o que na sua opinião relativiza a sua compreensão. Cai-se muita na afirmação de que é assim porque a natureza o mostra. Por tudo isto o autor acha urgente repensar o ensino destas leis com vista a facilitar o processo de aprendizagem das mesmas.

Noll (2002) propõe, então, o seguinte em relação às três leis:

- devem ser ensinadas pela seguinte ordem: segunda, terceira e só por fim a primeira;
- o formalismo matemático deve apenas ser o indispensável;

- o aluno deve tentar compreender sempre porque é que a lei aparece e não olhá-la como qualquer coisa que tem que ser assim;
- os conceitos devem ser evolutivos e as equações devem ir surgindo umas das outras;
- explicar sempre a partir de órbitas elípticas e não de circulares, como preconizam a maior parte dos programas, uma vez que a órbita circular é que é a excepção.
- Explicar as leis utilizando apenas os conceitos de momento angular, conservação de energia, equação de uma elipse e velocidade dos satélites no periélio e afélio.

No artigo podemos ver a explicação de todas estas situações e mais no final o autor prova que o círculo é mesmo uma ocasião quase que de excepção, uma vez que só acontece quando o seno do ângulo que o ponto de lançamento faz com o foco da elipse é 1, isto é quando a excentricidade vale 0.

Como conclusão refere que, na sua opinião, este método que parte da elipse é muito mais correcto pedagogicamente e provoca muito mais satisfação do ponto de vista intelectual. Ele afirma que todas as derivações apresentadas destas leis ajudam não só a compreendê-las como também a compreender melhor algumas aplicações da conservação do momento linear e também da conservação da energia mecânica. Acha também que os requisitos exigidos quer ao nível da matemática, quer da física estão perfeitamente ao alcance de alunos antes da sua entrada na faculdade. Correspondendo no caso, em relação a Portugal, aos 11º e 12º anos de escolaridade.

As famílias das órbitas de Kepler (Butikov, 2003)

Acerca das famílias das órbitas de Kepler Butikov (2003) discute como estas se comportam, mantendo constante uma variável. Estuda estas situações analisando três situações ou pressupostos distintos. Essas situações são:

- ✓ o ponto inicial da órbita é comum, as velocidades tem a mesma direcção mas magnitudes diferentes – o autor com um software criado pelo própria determina que nesta situação as órbitas pertencem a famílias, isto é, tem sempre o mesmo aspecto gráfico.

- ✓ A velocidade de lançamento é na mesma direcção mas tem diferentes magnitudes – Todas as trajectórias são tangentes à posição inicial, há medida que a velocidade aumenta, aumenta também a amplitude da elipse, aumentando por isso a distância ao segundo foco.
- ✓ As velocidades iniciais são iguais – neste caso as trajectórias irão apenas ocupar uma zona muito restrita do espaço. Os eixos maiores das órbitas serão iguais e pela terceira lei de Kepler os períodos de revolução também.

Comentário ao artigo: *As famílias das órbitas de Kepler (Romanovskis, 2004)*

Romanovskis (2004) agradece o trabalho de Butikov (2003) descrito antes, e enaltece o trabalho executado neste sentido pelo engenheiro letão Friedrich Zander. Este engenheiro estudou as órbitas dos rockets baseando-se nas leis de Kepler. O autor conclui que as famílias das órbitas de Kepler têm uma história muito interessante e uma solução surpreendente:

“se conhecermos a velocidade e a direcção de um projectil e apenas uma distância do centro da força, podemos construir a órbita do projectil analiticamente.”⁵²

As leis de Kepler, o Sistema Solar e a Astronomia (Topa, 2004)

No seu estudo, recentemente publicado, Topa (2004) propõe o ensino das leis de Kepler ao 2º Ciclo do Ensino Básico. A nós parece-nos uma proposta bastante interessante mas em simultânea muito arrojada. Lendo o trabalho fica-se com uma motivação extra para ensinar este tema, parece-nos no entanto ser de mais fácil aplicação no 3º ciclo do Ensino Básico. Podia sem dúvida ser uma situação a trabalhar na Área de Projecto, sendo um tema de tal maneira aglutinante que a maioria das disciplinas poderiam participar. Senão vejamos, na construção dos vários modelos (Educação Visual e Educação Tecnológica), nos relatos históricos, pesquisa, tradução e construção de textos explicativos (História, Língua Portuguesa, Inglês, Francês e/ou Espanhol), leis e conceitos de

⁵² Citado por Romanovskis, 2004, pág. 18

Astronomia (Geografia, Ciências Naturais, Ciências Físico-Químicas e Matemática), que são praticamente todas as disciplinas deste ciclo de estudos.

Em termos de ensino-aprendizagem parece-nos que a interligação de todas estas disciplinas e o entrar no “espírito” do verdadeiro trabalho de projecto, será ponto assente para sucesso.

Programa Kepler (Fiolhais, et al, 1993)

Fiolhais et al (1993) elaborou um programa para ser utilizado em sala de aula nas mais diversas situações. Este programa é baseado em simulações e explicações matemáticas que podem ser utilizadas desde o 7º ano de escolaridade até ao 12º ano de escolaridade. Ao longo do capítulo quatro iremos dar algumas sugestões de utilização deste software.

O programa contém várias sugestões de fichas de trabalho e de exploração do mesmo.

Pode ser descarregado gratuitamente no endereço www.cienciaviva.pt

Conclusão

As abordagens em termos pedagógicos do tema são de índole bastante diferente. Enquanto a tese (Neves, 1986) nos propõe um evoluir de conceitos tornando quase “banal” a linguagem da astronomia, os artigos (Topper, 1991; Bridges, 1995; Noll, 1996; Bucher, 1998; González-Villanueva, 1998; Butikov, 2003; Romanovskis, 2004) têm uma linguagem muito mais formal.

Da tese (Neves, 1986) podemos retirar conclusões e abordagens para a nossa perspectiva de ensino da primeira lei ao nível do Ensino Básico, e também algumas ideias para abordagem do assunto no ensino secundário. Pelo contrário no que diz respeito aos artigos terão de ser utilizados apenas para abordagens do Ensino Secundário e maioritariamente a nível do 12º ano.

Interessa por último referir o artigo de Noll (2002) por nós considerado de extrema importância no contexto de trabalho que estamos a desenvolver. Este irá ser por nós referido e a maior parte das ideias utilizadas ao longo da escrita do nosso próximo capítulo.

É também de excelente qualidade e enorme interesse didático-pedagógico o que nos é proposto no trabalho de Topa (2004), com a enorme vantagem do seu autor ser Português e conhecer por isso o nosso sistema de ensino.

Capítulo 4

Aplicação das Leis de Kepler nos Ensinos Básico e Secundário

Introdução

Propomo-nos criar uma metodologia de abordagem do tema, ao longo dos ensinos básico e secundário, em crescendo. No que diz respeito aos programas do Ministério da Educação, pensamos poder incluir alguns aspectos da nossa pesquisa, no sétimo ano de escolaridade na disciplina de Ciências Físico-Químicas, no décimo primeiro ano de escolaridade na disciplina de Física e Química A e no décimo segundo ano de escolaridade na disciplina de Física. Importa referir que o percurso do ensino secundário preconizado pela nova Revisão Curricular (DL 74/2004) prevê a hipótese da disciplina de Física e Química A, segundo ano, poder ser leccionada quer no décimo primeiro, quer no décimo segundo anos. Esta Revisão, na nossa opinião também vai fazer com que a opção pela disciplina de Física no décimo segundo ano seja cada vez menor, uma vez que os alunos passam a escolher apenas uma disciplina, em vez das três que poderiam escolher até ao ano lectivo de 2005-2006.

Pensando em todas estas variáveis e estando particularmente atentos, aos programas das três disciplinas propomo-nos criar uma abordagem de ensino que permita aos alunos compreenderem melhor as leis de Kepler.

Para atingir este objectivo, as metodologias utilizadas foram:

- Desenvolvimento de estratégias de ensino nas disciplinas de:
 - Ciências Físico Naturais do 7º ano;
 - Física e Química A dos 11º ou 12º anos;
- Desenvolver conteúdos alargados para os alunos que frequentarem a disciplina de Física no 12º ano;
- Desenvolvimento de textos/documentação de natureza histórica para apoio bibliográfico dos alunos;
- Elaboração de fichas de trabalho para os alunos;

- Pesquisa e selecção de sites sobre a vida e obra de Johannes Kepler e sobre simulações de movimentos dos planetas e leis de Kepler, que os alunos possam utilizar nas aulas;
- Pesquisa e construção de um dispositivo experimental para o estudo qualitativo e quantitativo das leis de Kepler.

A relevância dos textos históricos, bem como a sua relação com a aprendizagem das ciências experimentais pode ser de alguma forma esclarecida no excerto que se segue do artigo de Valadares (2005):

Os *science studies* actuais, embora destacando os factores sociológicos na construção das ciências ditas experimentais, rejeitam o reducionismo brutal que muitos construtivistas sociais revelam com uma visão relativista e profundamente céptica dessas ciências. Ora a luta travada entre o construtivismo e o realismo carece de objecto, a não ser que o realismo caia num dogmatismo inaceitável ou o construtivismo se prolongue pela desconstrução da objectividade. No que se refere ao valor da ciência, podemos falar numa *validade* transcendente, objectiva ou axiológica, assente no acordo entre a concepção científica sobre cada objecto e esse objecto, e a validade imanente, universal ou normativa, baseada no acordo intersubjectivo entre os membros da comunidade científica acerca do valor das representações dos objectos pesquisados. Tenho defendido que as duas formas de validade são legítimas e que o facto de não podermos, de acordo com Kant, aceder ao conhecimento verdadeiro das «coisas em si», não significa que estejamos impedidos de nos aproximarmos cada vez mais desse conhecimento. A ideia construtivista radical de que as representações da Física não correspondem a uma realidade objectiva e exterior ao sujeito (abdicação do princípio da correspondência) tem sido fortemente criticada. Com a nova teoria do caos, até o conhecimento do mundo quântico assumiu uma visão muito mais realista ao prescindir-se da irreversibilidade devida ao observador no acto de medida baseada no conhecido e enigmático princípio do colapso da função de onda.⁵³

A elaboração/construção dos textos atrás referidos irá obedecer à seguinte estratégia:

- no sétimo ano – pedir a dois alunos deste nível etário para construírem uma história sobre Kepler. Essa história partirá de informação por nós seleccionada e que será fornecida às duas crianças. Depois de escritos serão por nós avaliados e melhorados se for caso disso. Estes dois alunos foram alunos do mestrando no 7º ano, embora os textos lhe tenham sido solicitados durante este ano lectivo, os mesmos foram escritos com os alunos já a frequentarem o 8º ano;
- no décimo primeiro ano – seleccionaremos informação histórica e científica sobre o aparecimento das leis, bem como factos relevantes da

⁵³ Texto extraído e adaptado de Valadares, J. A (2005), consultado na página www.blues.uab.es, dia 25 de Setembro de 2006.

vida de Kepler e entregaremos esses registos a um professor de História, a um professor de Filosofia, e a um aluno de 12º ano. Solicitaremos aos três que criem um texto a partir da informação que lhe fornecemos. Posteriormente, analisaremos as perspectivas e tentaremos nós criar um texto para poder utilizar neste nível de ensino. Com estas e outras estratégias tentaremos abordar o tema de forma inovadora, sempre com uma forte perspectiva histórica e cultural, que nos parece essencial para o assimilar de alguns conhecimentos científicos;

- o no décimo segundo ano - tentaremos propor um aumento do número de aulas no capítulo 4 do programa (Gravitação) de modo a que se possa abordar na sua totalidade as três leis de Kepler., bem como toda a envolvência social, política e cultural da época em que as mesmas foram descobertas.

Sabendo que o aumento do número de aulas não será suficiente para a abordagem desta perspectiva científica-filosófica, iremos também sugerir uma abordagem deste tema na disciplina Área de Projecto no novo plano de estudos do 12º ano de escolaridade.

Pensamos que, os professores de Físico-Química poderão utilizar as nossas sugestões para as suas aulas, de modo a que o ensino-aprendizagem das leis de Kepler e, dos movimentos planetários se torne particularmente interessante.

Sétimo ano de escolaridade (Ciências Físico-Químicas)

A exploração da primeira lei neste nível de ensino, deve inserir-se aquando da exploração dos capítulos II e III do programa da componente de física desta disciplina. Os nomes destes capítulos são: II – Sistema Solar; III - Planeta Terra. Na nossa opinião, para abordar Kepler, podemos relacionar os seguintes conteúdos dos dois capítulos: II / 1 - Astros do Sistema Solar (1.1. Sol, planetas e luas); III / 1 – Terra, Sol e Lua (1.2. As estações do ano); III / 2 – Movimentos e forças (2.3. As forças e o movimento de translação dos planetas e 2.4. Massa e Peso).

Com esta abordagem, bem como com outras que, o próprio programa (Galvão et al, 2001) preconiza, o aluno deverá atingir as seguintes competências, **as duas últimas** são por nós acrescentadas e derivam da nossa proposta de abordagem de Kepler para este nível de ensino:

- Distinguir os dois tipos de movimento: translação e rotação;
- Identificar o significado de período de translação e período de rotação;
- Explicar a ocorrência das estações do ano com base no movimento de translação da Terra e na inclinação do eixo de rotação;
- Caracterizar a força gravitacional responsável pelo movimento dos planetas à volta do Sol e dos satélites à volta dos planetas;
- Identificar o peso como um caso particular da atracção universal;
- Reconhecer a importância de Kepler para a descoberta dos movimentos planetários;
- Identificar a primeira lei de Kepler.

O resumo da vida de Kepler e do aparecimento da primeira lei será entregue aos dois alunos de oitavo ano. Os objectivos que pretendemos atingir serão também entregues de forma clara e inequívoca a esses alunos. A informação que preparámos para que, os dois alunos tentem criar uma história interessante sobre a vida de Kepler e o aparecimento da primeira lei, encontram-se em anexo (**ver anexo A**).

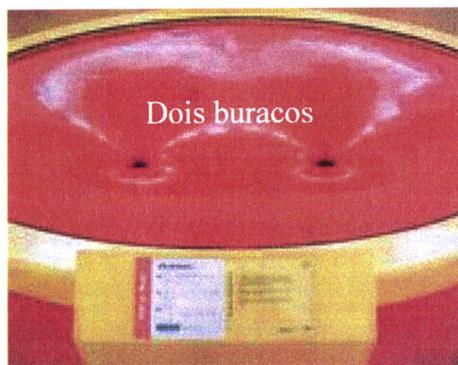
Os dois alunos criaram de forma independente as histórias que se encontram nos anexos B e C (**ver anexos**).

Tendo sempre como objectivo primordial construir um texto com valor histórico científico e pedagógico, as histórias foram analisadas através de critérios por nós definidos. Como nos pareceram extremamente bem conseguidas, parece-nos pois lógico que se deixem as duas histórias, de modo a que cada docente as utilize da melhor forma.

As histórias que resultaram deste trabalho de pesquisa parecem-nos de fácil utilização em contexto de sala de aula, porque explicam de uma forma clara como surgiu a primeira lei de Kepler e qual a envolvente social, política e cultural, em que esta lei surgiu. O facto da mesma ter sido quase totalmente construída por dois alunos do 7º ano, trará bastantes vantagens na área da compreensão e aquisição de conhecimentos.

Para este nível de ensino (7º ano) propomos apenas, a exploração física da primeira lei. O envolvimento matemático deve ser mínimo e de acordo com as competências que estes alunos devem possuir para a referida disciplina. Assim propomos a introdução deste tema numa aula de noventa minutos onde sugerimos a utilização de uma das histórias que se encontram em anexo. A exploração e compreensão do texto podem ser acompanhadas de mostras de modelação da primeira lei de Kepler, pelo que sugerimos a consulta do sítio *astro.if.ufrgs.br/Orbit/orbits.htm*⁵⁴. Em substituição deste site poderão os colegas também utilizar o programa Kepler (Fiolhais et al, 1991). O dispositivo experimental por nós construído também poderá ser utilizado para que os alunos consigam visualizar a esfera (planeta principal ou secundário) a descrever uma elipse em volta do buraco (Estrela ou planeta principal).

No caso da área curricular não disciplinar de Área de Projecto sugerimos a abordagem proposta por Paulo Topa (Topa, 2003) que nos parece de grande utilidade para a agregação de conhecimentos vários.



Sugerimos ainda que no caso da turma organizar uma visita de estudo possa ser introduzido mais uma vez este tema, por exemplo, visitando a exposição permanente do Pavilhão do Conhecimento, “Vê, faz e aprende”. Podem visitar o “módulo órbitas” onde existe um dispositivo experimental o qual permite, que os alunos

Figura 22 – Dispositivo Experimental em exibição no Pavilhão do Conhecimento, Lisboa⁵⁵

entendam a existência de órbitas bem mais complicadas do que a elipse. Estão neste caso, as órbitas ovais, em forma de pêra (∞), e até mesmo em forma de “W”. Esta situação acontece porque o dispositivo experimental possui dois buracos (estrelas), próximos um do outro que vão interferir na órbita da esfera (outro corpo celeste).

⁵⁴ Sítio consultado em 15 de Julho de 2006.

⁵⁵ Foto extraída de:
www.pavconhecimento.pt/exposicoes/modulos/index.asp?acao=showmodulo&id_exp_modulo=162&id_exposicao=6

Décimo primeiro ou décimo segundo anos de escolaridade (Física e Química A)

Convém explicar que a situação de aparecerem dois anos curriculares no título se deve à alteração introduzida pela Revisão Curricular do Ensino Secundário, consagrada no DL n.º 74/2004. Esta Revisão teve início no ano lectivo de 2004/05, para os alunos que se matricularam pela primeira vez no 10.º ano de escolaridade. Percorrerá o ciclo de estudos até ao ano lectivo de 2006/07, ano em que os mesmos alunos atingirão o 12.º ano de escolaridade. A mesma Revisão Curricular permite ainda que: a disciplina de Física e Química A seja opcional e bianual, os alunos possam iniciar a disciplina de Física e Química A, quer no 10.º, quer no 11.º ano, o que implica que o segundo ano da disciplina possa ser o 11.º ou o 12.º ano, respectivamente.

Nesta disciplina parece-nos já bastante importante abordar as três Leis de Kepler, embora a situação apenas apareça subentendida no programa do 1.º ano da disciplina. Assim, este conteúdo deve ser abordado no ponto 1.2 (Da Terra à Lua), da Unidade 1 do referido programa (Movimentos na Terra e no Espaço).

Parece-nos importante para esta abordagem a inter relação entre várias questões a abordar no ponto do programa já mencionado. Assim, devemos relacionar os conteúdos: lei da gravitação universal; o movimento segundo Aristóteles, Galileu e Newton e movimentos de satélites geostacionários.

Pretendemos que o aluno, com a abordagem preconizada pelo programa (Caldeira, H. et al, 2003), mais a abordagem por nós aqui sugerida, consiga atingir os seguintes objectivos. **Os três últimos** são acrescentados por nós e resultam da aplicação da nossa abordagem das leis de Kepler:

- Enunciar a lei da gravitação universal;
- Interpretar o movimento da Terra e de outros planetas em volta do Sol, da Lua em volta da Terra e a queda dos corpos à superfície da Terra como resultado da interacção gravitacional;
- Calcular o valor da aceleração da gravidade, a partir da lei da gravitação universal, para uma distância da ordem de grandeza do raio da Terra e confrontar com o valor determinado experimentalmente;
- Interpretar o movimento de um satélite numa órbita circular em torno da Terra, com base na experiência pensada de Newton;

- Explicar a diferença entre o conceito de movimento de Aristóteles, Galileu, Kepler e Newton;
- Analisar fisicamente uma órbita elíptica de um corpo celeste em torno de outro;
- Partindo da análise anterior prever velocidades e distâncias percorridas por esses corpos celestes, naquele tipo de órbita.

Sugerimos para além de tudo o que é preconizado pelo programa do 2º ano da disciplina, a abordagem dos conceitos em aulas teóricas bem como em actividades prático laboratoriais. Pensamos que, para além da importância histórico-científica do conhecimento que nos foi deixado por Kepler, devem também ser abordadas em termos quer físicos, quer matemáticos as implicações das suas leis.

Pensamos pois que, os professores poderão utilizar os textos criados numa perspectiva didáctico-pedagógica sobre o assunto, alertando sempre para o facto da ciência não surgir do “nada”, isto é, surge no contexto político e social da época, bem como do facto do próprio cientista, além de ter uma mente brilhante, se encontrar no sítio certo, à hora certa. Neste contexto, podemos citar uma frase de Louis Pasteur (séc. XIX):

“No campo da observação, a sorte favorece só as mentes preparadas.”⁵⁶

Os professores de História e Filosofia, por nós contactados, construíram fichas de trabalho ou aulas para explanar conteúdos, das suas disciplinas no Ensino Secundário. Achando que esta ideia é uma e, que se coaduna com a postura emergente desta reforma do ensino, no sentido da interacção dos vários conhecimentos adquiridos nas várias disciplinas, parece-nos também possível “re-utilizar” estes textos aquando da exploração do tema na disciplina de Física e Química A. Esta postura poderá logo à priori favorecer a interligação disciplinar, pois como podemos verificar nos anexos F e G (ver anexos) a perspectiva, a estrutura e a maneira como o tema é “pensado” é visivelmente diferente do pensamento “comum” dos professores de física. Pensamos que estes textos têm todas as características necessárias para uma abordagem do tema visando atingir o primeiro objectivo por nós sugerido. A aluna de 12º ano depois de ler o que lhe fornecemos criou um texto que revela impressionantes capacidades de síntese

⁵⁶ Pasteur, Citado por Thomas, 1953, pág. 186

e de asserção, uma vez que conseguiu extrair o mais importante e criar um texto facilmente utilizável em aulas deste nível de ensino (**ver anexo E**).

Para que os alunos possam atingir os dois últimos objectivos por nós sugeridos propomos a utilização do dispositivo experimental por nós construído, para a execução de uma actividade prático-laboratorial. Esta actividade deve dentro dos possíveis, ser levada a cabo pelo professor seguindo as nossas recomendações. Poderá ser sempre acompanhada de mostras de simulações informáticas das leis de Kepler, pelo que sugerimos a consulta do sítio *astro.if.ufrgs.br/Orbit/orbits.htm* ou a utilização do programa de computador Kepler (Fiolhais et al, 1993).

AL (Actividade Laboratorial) – Órbitas planetárias

Questão-problema

Um planeta em torno do Sol, ou uma lua em torno de um planeta principal, descreverão o mesmo tipo de órbita?

No final da actividade o aluno deve concluir que considerando um sistema constituído por dois corpos, a órbita descrita pelo corpo com menos massa é sempre elíptica.

Objecto de ensino:

- Interpretação de uma órbita elíptica.
- Relação entre velocidade e distância percorrida naquele tipo de órbitas.

Objectivos de aprendizagem:

- Interpretar o conceito de órbita planetária;
- Reconhecer que actualmente a Ciência é construída com base na observação e na medição;
- Identificar a relação entre velocidade e espaço percorrido neste tipo de órbitas;
- Calcular a aceleração centrípeta destes movimentos.

Material e equipamento:

Dispositivo experimental;

Esfera de chumbo;

Balança;

Marcador;

Régua graduada;

Máquina de filmar com tripé;

Programa Vídeo Edit Magic 4.2.

Sugestões de realização: Protocolo Experimental:

- Esboçar o gráfico da distância percorrida pela esfera versus tempo;
- Calcular a aceleração centrípeta sentida pela esfera aquando da descrição da órbita na queda;
- Com base na investigação, na análise das simulações informáticas e nos resultados obtidos apresentar argumentos que respondam à questão formulada.

Décimo segundo ano de escolaridade (Física)

Só no ano lectivo de 2006-2007, os alunos que iniciaram o seu percurso já nesta Revisão Curricular atingirão o 12º ano preconizado por esta. Neste os alunos do Curso de Ciências e Tecnologias terão 3 disciplinas trianuais obrigatórias (Português, Matemática e Educação Física), uma disciplina anual obrigatória (Área de Projecto) e uma disciplina anual optativa. Estas opções podem ser várias, mas por exemplo das cinco disciplinas específicas (Biologia, Física, Geologia, Psicologia e Química), em que os alunos na antiga reforma tinham que escolher três, agora apenas podem escolher uma.

Esta exigência da reforma vai “acabar”, na nossa opinião com a opção pela disciplina de Física neste ano. Esta situação já foi mais que falada nos media, mas não alterou a posição de governantes. Se pensarmos que os alunos deste agrupamento irão fazer os seus exames específicos (de acesso ao Ensino Superior) nos 11º ou 12º anos,

quando estiverem a frequentar o segundo ano das disciplinas específicas, que poderão ser, Física e Química A, Biologia e Geologia e Desenho e Geometria Descritiva B, então a escolha da disciplina de 12º ano não recairá sobre a mais útil, mas sempre sobre a mais fácil de tirar boas notas. Destas três disciplinas os alunos apenas escolhem duas, que funcionarão como disciplinas específicas. Depois farão exame a mais duas das três disciplinas trianuais (Português e Matemática). Os exames que contarão para o acesso ao Ensino Superior poderão ser Matemática e as disciplinas bianuais, nunca a disciplina de opção do 12º ano. Segundo este ponto de vista e tendo em linha de conta os resultados conseguidos à disciplina de Física ao longo dos anos, parece-nos claro que esta dificilmente será a primeira opção dos estudantes. Se conjugarmos o que atrás foi referido com o número mínimo de inscrições (catorze) de alunos numa disciplina de opção que permita ao Conselho Executivo a sua abertura, parece-nos mais que óbvia a “morte anunciada” desta disciplina. Na nossa perspectiva esta situação pode ser fatal para alguns cursos superiores onde a disciplina de Física se considera fundamental. Poderá levar a resultados cada vez menos encorajadores nos primeiros anos destes cursos, levando muitas vezes à desistência dos estudantes.

Depois de expormos as nossas razões contra o facto de se terem reduzido o número de disciplinas específicas de opção no 12º ano resta-nos sugerir uma abordagem do tema que propomos na disciplina de Física (para muito poucos estudantes) e também na Área de Projecto (para um universo estudantil bastante superior).

As competências científicas que os alunos devem atingir nesta fase da sua formação estão bem claras no programa definido para a disciplina pelo Ministério da Educação. Este também sugere e enfatiza todos os pré-requisitos necessários aos alunos, quer ao nível da Física, quer ao nível da Matemática, para poderem ter sucesso escolar nesta disciplina. O que nós defendemos é que a abordagem das leis de Kepler tenha hipótese de ser feita num maior número de momentos de aprendizagem. O programa actual propõe que se aborde em 4 aulas de 90 minutos o tema Gravitação. Este tema é composto por oito sub-temas: Teorias pré-newtonianas; Leis de Kepler; Lei de Newton da gravitação universal; Constante de gravitação universal; Experiência de Cavendish; Campo gravítico; Força gravítica e peso e Energia no campo gravítico. Pretende ainda que se explore nestas quatro aulas algo prático-laboratorial relacionado com o tema.

Parece-nos pois claro que o tempo é muito diminuto. Sabemos que os programas são muito extensos e que dificilmente se conseguem cumprir. Por este motivo começaremos então por reflectir no seguinte:

- de acordo com o que explicámos atrás os alunos que a partir do próximo ano escolherem a disciplina de Física no 12º ano serão sempre alunos extremamente motivados para o estudo da mesma;
- com este perfil de alunos será realmente importante explorar a “correr” um programa extremamente extenso, onde podemos por muito pouco tempo parar para reflectir;
- ou por outro lado escolher temas de pertinência e explorá-los através de situações de aprendizagem-ensino bem mais aliciantes;
- juntamos também a estas reflexões o facto de sabermos que a maior parte dos temas voltarão a ser abordados nas Universidades, mais uma vez num “corropio” cuja meta é as frequências e a aprovação em contraste com a aprendizagem dos conteúdos de forma sólida e assimilada.

Partido dos pontos atrás referidos e tendo em conta que este trabalho se dedica a Johannes Kepler, achamos nós que um dos temas pertinentes será a abordagem das leis de Kepler tentando relacioná-las com as conclusões de Isaac Newton.

Pretendemos que o aluno com a abordagem preconizada pelo programa (Fiolhais, M. et al, 2004), mais a abordagem por nós aqui sugerida consiga atingir os seguintes objectivos, os **terceiro, quarto e quinto** são acrescentados por nós e resultam da aplicação da nossa abordagem das leis de Kepler:

- ◆ Abordar os aspectos essenciais dos modelos pré-newtonianos do sistema solar;
- ◆ Compreender que os registos de Brahe foram essenciais para a formulação das leis de Kepler;
- ◆ Deduzir as leis de Kepler a partir dos conceitos de elipse, conservação do momento linear e conservação da energia mecânica;
- ◆ Compreender que a órbita circular é uma excepção e que só acontece quando a excentricidade é 0;
- ◆ Perceber quais as conclusões que Newton tirou de cada uma das leis;
- ◆ Reconhecer que os dados de Kepler, por si só, não permitem obter um valor para a constante de gravitação universal;

- ◆ Aplicar o modelo do movimento circular uniforme ao movimento dos planetas em torno do Sol e explicar os raciocínios de Newton que o levaram à lei da gravitação universal;
- ◆ Enunciar e aplicar a lei de Newton da gravitação universal;

As estratégias por nós delineadas para que se possam atingir os objectivos atrás propostos irão recair muito em aulas com abordagens históricas, demonstrações matemático-dedutivas e actividades prático laboratoriais. Sugerimos pois que o tema seja abordado através de quatro estratégias principais:

- ❖ Pesquisa orientada sobre a conjuntura política, cultural e social da altura em que Kepler viveu. Podem utilizar textos por nós sugeridos já neste capítulo, páginas da Internet como por exemplo:
www.colegiosaofrancisco.com.br⁵⁷;
www.andrews.edu/~calkins/math/biograph/biokeplr.htm⁵⁸
kepler.nasa.gov/johannes/⁵⁹
www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/Biographies/Kepler.html⁶⁰
(biografias extremamente bem resumidas de Johannes Kepler), enciclopédias, entre outras fontes. A sugestão de várias páginas com biografias de Kepler aumenta a capacidade de escolha por parte dos professores, bem como o cruzamento de pormenores históricos;
- ❖ Apresentação e discussão com o grupo turma sobre os factos mais relevantes, tentando o professor fazer sempre uma última súmula para realçar o mais importante;
- ❖ Com o auxílio do colega de matemática tentar explorar as deduções físico-matemáticas para que se entendam a s três leis de Kepler;
- ❖ Permitir que os alunos observem simulações computacionais das leis no sítio astro.if.ufrgs.br/Orbit/orbits.htm e que executem uma actividade experimental (a sugerida para o 11º ano), onde possam exercitar cálculos sobre as leis que estão a estudar. O programa de computador Kepler (Fiolhais, et al 1993) poderá ser um auxiliar precioso para este tipo de aulas. Esta actividade deve ser explorada em contraste com a exploração

⁵⁷ Página consultada em 18 de Agosto de 2006

⁵⁸ Página consultada em 20 de Outubro de 2006

⁵⁹ Página consultada em 3 de Fevereiro de 2007

⁶⁰ Página consultada em 3 de Fevereiro de 2007

do ano anterior e verificar o que de novo pode ser acrescentado às conclusões anteriormente obtidas.

Décimo segundo ano de escolaridade (Área de Projecto)

Nesta disciplina sugerimos uma abordagem numa perspectiva histórico-filosofica, através da qual os alunos possam contextualizar os conceitos de forma muito mais vasta. Deixamos pois aqui algumas sugestões:

- ❖ Utilizar os textos e propostas de trabalho sugeridos em anexo (ver anexos F e G);
- ❖ Tentar analisar quais as possíveis perspectivas astronómicas da obra-prima de Luís Vaz de Camões “Os Lusíadas”, utilizando como trabalho de referência o de Luciano Pereira da Silva que pode ser consultado no sítio www.instituto-camoes.pt/cvc/bvc/astronomialusíadas⁶¹;
- ❖ Teatralizar uma peça em que se definam personagens importantes que defendam os dois paradigmas: modelo geocêntrico e modelo heliocêntrico. Alguns elementos da turma serão espectadores e tentarão perceber os argumentos das personagens. Deve ser comentado acreditando que os dois modelos são possíveis de existir.

Conclusão

Ao longo do capítulo propusemos várias abordagens e estratégias de ensino das leis de Kepler e da vida e obra deste cientista, desde o 7º ano até ao 12º ano de escolaridade. Propusemos também algumas abordagens interdisciplinares numa perspectiva CTS⁶², pois o tema é excelente para este tipo de abordagens e, sobretudo para ser desenvolvido

⁶¹ Página consultada em 2 de Julho de 2006; Neste momento encontra-se inactivo. Os textos originais foram publicados na Revista da Universidade de Coimbra entre 1913 e 1915. Outra referência é Silva, L.P. (1943)

⁶² Ciência, Tecnologia e Sociedade.

nas NAC⁶³. Abordaram-se também aqui algumas propostas para a disciplina de Área de Projecto de 12º ano que apenas começará a ser leccionada no ano lectivo 2006-2007.

⁶³ Áreas Curriculares Não Disciplinares.

Capítulo 5

Desenvolvimento e construção do Dispositivo Experimental

Introdução

As leis de Kepler aplicam-se a todos os casos em que um corpo celestial orbita um outro, sob a influência da gravitação: aos planetas orbitando o Sol, luas orbitando planetas, satélites artificiais orbitando a Terra ou outros corpos do sistema solar, e mesmo estrelas orbitando outras estrelas. Afim de introduzir esta matéria nos ensinamentos básica e secundário e motivar os professores, deve ser colocado à disposição um material didáctico de que eles possam fazer uso imediato. Esse material, além de conteúdos teóricos e conceptuais, exercícios e episódios históricos, deve também incluir projectos práticos e experimentais. Por isso propomos construir um protótipo experimental a que os professores possam recorrer, aquando da abordagem do tema “Leis de Kepler” nos diferentes níveis de ensino.

Para a sua execução recorreremos ao Pavilhão do Conhecimento, onde observámos um dispositivo básico exposto.



Após esta observação pensámos então no que nos propúnhamos a construir.

Figura 23 – Dispositivo Experimental I em exibição no Pavilhão do Conhecimento, Lisboa⁶⁴

⁶⁴Foto retirada de:

www.pavconhecimento.pt/exposicoes/modulos/index.asp?acao=showmodulo&id_exp_modulo=162&id_exposicao=6

Este trabalho consiste na execução de um protótipo experimental cujo esboço está apresentado na figura 24.

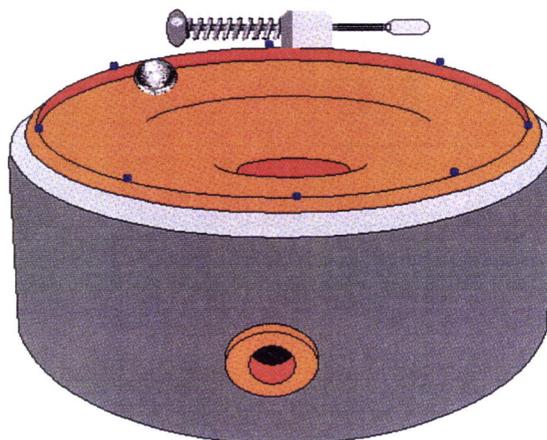


Figura 24 – Maqueta do protótipo

Analisaremos qualitativamente as Leis de Kepler, através do movimento da esfera ao longo da sua órbita, com os alunos do 7º ano de escolaridade, que não têm noções de matemática que lhe permitam executar cálculos muito elaborados. No entanto podem calcular a velocidade da esfera, como resultado do quociente entre a distância percorrida e o tempo gasto a percorrê-la.

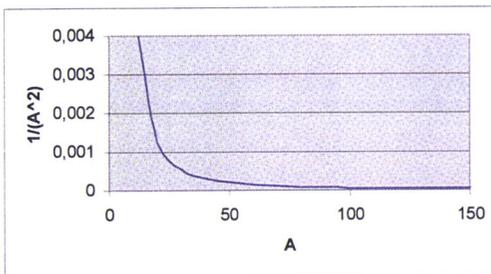
Os registos do movimento da esfera serão também analisados de forma quantitativa (mais complexa) através do estudo da relação entre a distância percorrida (marcada na órbita) e o tempo medido. Poderão calcular a velocidade em pontos distintos da trajectória e tentar verificar que a velocidade próxima do foco da elipse é superior. Poderão também derivar o valor da aceleração a partir dos valores de velocidade. A este nível trabalharão, numa primeira fase os alunos dos 11º/12º anos, na disciplina de Física e Química A, sendo depois aprofundados os cálculos e as conclusões nesses mesmos alunos no 12º ano, na disciplina de Física.

A primeira fase de construção foi a projecção do molde, foi sendo feita através do processo tentativa e erro e esta situação vai ser descrita ao longo do capítulo.

A escolha do declive

O declive que vai da superfície elíptica ao orifício do protótipo foi calculado tendo como suporte, o facto da intensidade da força gravitacional de um corpo celeste ser inversamente proporcional à distância ao quadrado, a que este se encontra do outro.

Atribuámos ao eixo dos xx números aleatórios, calculando o inverso de cada número ao quadrado para dar origem ao perfil pretendido. No sentido de obter o protótipo mais adequado, com um perfil o mais suave possível, foi aplicada uma metodologia experimental. Esta suavidade está relacionada com o facto do protótipo ter ausência da segunda massa (força de atracção da segunda massa), estando para esse efeito o buraco do protótipo. Multiplicámos então o gráfico original por constantes entre]0;1], obtendo uma série de gráficos, representando os perfis para análise do pretendido. Segundo os critérios acima referidos seleccionámos como perfil ideal, o do gráfico número 7.



O declive (ver figura 25) que vai da superfície elíptica ao orifício do protótipo foi calculado sabendo que a intensidade da força gravitacional de um corpo celeste é inversamente proporcional à distância ao

Figura 25 – Gráfico 7 (anexo H) utilizado para a obtenção do declive do dispositivo experimental.

quadrado, a que este se encontra de outro. Esta forma de calcular o declive provém da Lei da Atracção Universal onde se verifica esta proporcionalidade. Qualquer curva poderia ter sido utilizada, foi escolhida a do gráfico 7, esta escolha foi de ordem visual e prática. Correspondeu a uma questão de ajuste com a forma mais prática de construção do protótipo (curva menos abrupta).

Construção do Dispositivo Experimental



Figura 26 – Borracha furada.

Pensámos construir o molde a partir da deformação da borracha virgem. Para tal adquirimos uma placa de borracha e foi construído um suporte que a prendia. No meio da superfície foram presos pesos de modo a que a borracha

deformasse. A borracha não aguentou a pressão e ao fim de pouco tempo cedeu, como mostra a figura. Como esta situação não resultou, com o auxílio do técnico do laboratório de Física analisámos novas soluções.

Pensámos então construir o molde em poliuretano, utilizando para isso a substância sólida e também a mesma em espuma. Do poliuretano sólido cortaram-se



Figura 27 – Corte do poliuretano.

várias tiras (figura 27), já com o declive que tínhamos escolhido estas foram unidas no centro e colocadas sobre uma base (figura 28). Os espaços em branco foram cheios com a espuma de poliuretano (figura 29).

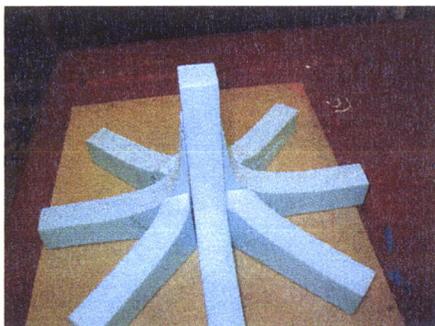


Figura 28 – Tiras de poliuretano unidas.



Figura 29 – A espuma.

Esta espuma cresceu e ocupou todos os espaços, saindo mesmo da estrutura. Posteriormente foi necessário esperar cerca de 15 dias para que tudo ficasse bem seco e



Figura 30 – Eliminar o excesso da espuma.

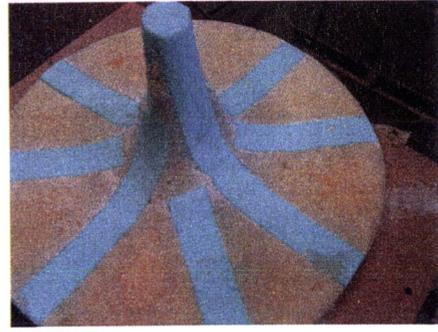


Figura 31 – O molde de poliuretano.

agregado. Após este tempo foi necessário retirar a espuma em excesso (figura 30). Este processo foi sendo realizado com o auxílio de serras, com bastante cuidado para não se cortarem pedaços que tinham que obrigatoriamente de fazer parte da estrutura. No final e com o auxílio de lixa própria o molde foi lixado de modo a ficar com o menor número de imperfeições possível (figura 31), de seguida foi todo forrado com fita isoladora (figura 32). Sobre esta fita procedeu-se à fibragem (com fibra de vidro) da estrutura (fi-



Figura 32 – A fita isoladora.



Figura 33 – A fibragem.

gura 33). Este processo teve que ser feito obedecendo a situações de segurança uma vez que o endurecedor da fibra de vidro é altamente tóxico. Para que a fibra secasse e pudesse ser retirada foi necessário esperar cerca de 15 dias.



Figura 34 – O desenformar.



Figura 35 – O molde.

Após este tempo tivemos que retirar o molde completo da base de madeira onde tinha sido construído. Foi descolado da placa e todos os pedaços de poliuretano foram partidos e retirados da estrutura, tendo por fim obtido um molde que já há alguns meses perseguíamos (figura 34). De seguida analisámos o molde que tínhamos obtido, verificando com alguma frustração que possuía demasiadas irregularidades (figura 35). De acordo com o que pretendíamos era mais uma estrutura para eliminar, pois o atrito seria elevado e nós não pretendíamos que o mesmo acontecesse no nosso dispositivo. Com alguma sensação de frustração, mas com enorme vontade de continuar tentámos então pensar noutra hipótese para começar o molde. Pensámos então construí-lo a partir duma estrutura de gesso.



Figura 36 – Chapa de ferro.



Figura 37 – Fabrico do molde em gesso.

Primeiro recortámos uma chapa em ferro obedecendo à figura que tínhamos obtido para o perfil (figura 36), chapa essa que tinha um sistema que permitia movê-la sobre o gesso para lhe ir fornecendo a forma desejada. Num estrado de madeira, com um parafuso central, ia-se colocando o gesso húmido e passava-se com a estrutura de ferro de modo a moldá-lo (figura 37). Este procedimento foi feito até o gesso ficar com a altura, espessura e declive desejados.



Figura 38 – Molde de gesso pintado.

Para que o gesso secasse em condições esperámos cerca de 15 dias. Passado este tempo o molde foi pintado com uma tinta impermeabilizadora (figura 38), para que posteriormente se pudesse proceder à fibragem. A fibragem foi feita da mesma forma que na tentativa anterior e esperámos o mesmo tempo para que secasse para se quebrar o gesso e ficarmos com o molde em fibra de vidro isolado do resto da estrutura. Este foi betumado e pintado com tinta celulósica azul.

No projecto inicial tínhamos pensado colocar um flipper para que a bola começasse a rodar. Analisámos a situação e pensámos substituir o flipper por uma rampa de acesso à elipse. Sobre o molde foi colocada uma calha elíptica e no acesso a essa calha foi colocada a referida rampa. Esta servirá para fazer com que a esfera entre na parte rotacional sempre com a mesma velocidade, que vai depender apenas da inclinação e comprimento da rampa.



Figura 39 – A calha e a rampa.



Figura 40 – Testando o dispositivo.

Nesta altura fizemos alguns testes com esferas de massas variadas para percebermos se poderíamos concluir o dispositivo experimental. Verificámos que embora com algumas imprecisões havia vezes em que a esfera rolava como se queria e parecia-nos que poderíamos vir a retirar algumas conclusões importantes.

Colámos então a calha e a rampa à estrutura com silicone de modo a poder ser removido se quisermos posteriormente alterar posições às várias peças do aparato. Retirou-se a silicone sobranete e poliu-se o fundo com lixa de água a fim de tornar o atrito, o mais pequeno possível. Pensámos em pintar a calha e a rampa com cores garridas de modo a que o aparato se tornasse mais atractivo para os alunos que o

viesses a utilizar. O molde foi cortado de modo a que o dispositivo ficasse mais pequeno. Foram colocados quatro pés e foi construído um cesto que encaixa no orifício central para recolha da esfera.

Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento é bastante simples, basta lançar uma esfera por uma calha e, o dispositivo funciona a nível qualitativo. A nível quantitativo, é necessário filmar os movimentos, para que os valores de distância e tempo possam ser medidos. Estas medidas baseiam-se em análise e tratamento de imagens utilizando um software, como por exemplo, o Vídeo Edit Magic 4.2..

Para que na filmagem pudessemos ter uma escala pré definida foram marcadas pintas amarelas junto à calha com uma distância constante de 10 *cm* entre cada pinta, excepto a última cuja diferença é de 11,2 *cm* devido à dimensão da elipse.

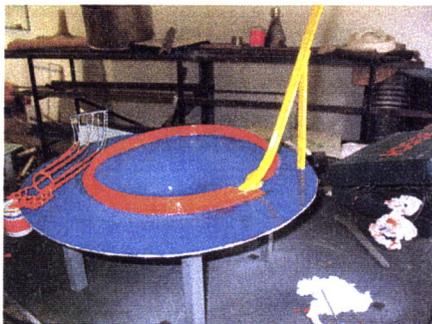


Figura 41 – O dispositivo experimental 1

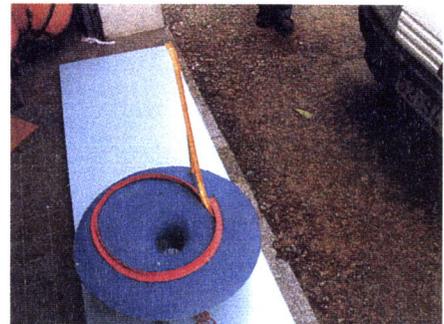


Figura 42 – O dispositivo experimental 2



Figura 43 – O dispositivo experimental 3

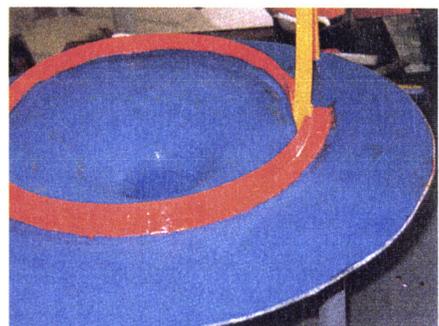


Figura 44 – O dispositivo experimental 4

Conclusão

Descrevemos ao longo do capítulo as tentativas que tivemos que fazer de modo a que criássemos da melhor forma possível o nosso dispositivo experimental. Este foi construído partindo de um pressuposto, mas foi sendo desenvolvido com base na tentativa e erro. À medida que o processo se ia desenvolvendo íamos pensando em qual a melhor forma de podermos evoluir o processo, abandonando o que se tinha criado para trás e que não tinha resultado. Este processo é extremamente rico pois com os erros tentávamos sempre aperfeiçoar cada vez mais o nosso dispositivo experimental.

Foi um processo que, por constrangimentos vários, demorou cerca de um ano a ser concluído, mas que no final mostra-nos que a persistência valeu a pena. Construámos algo de novo que pode vir a ser utilizado pelos nossos alunos em sala de aula e noutros contextos que nos venham a parecer úteis, de forma a rentabilizarmos da melhor forma possível a existência deste novo dispositivo experimental.

Capítulo 6

Análise e sistematização de dados recolhidos

Introdução

Após a construção do protótipo e com a intenção de poder de alguma forma testá-lo, tornava-se necessário proceder à recolha e sistematização de dados.

Numa primeira fase colocámos a esfera de ferro a girar com a mão e verificámos o que acontecia. Posteriormente arranjámos esferas de material diferente e marcando pontos sobre a órbita, filmámos a órbita descrita pela esfera, com o intuito de obter tempos e distâncias para assim podermos calcular velocidades.

Estes registos iriam ser cruciais para verificar se o dispositivo nos levava a cumprir alguns dos objectivos por nós traçados aquando da estruturação da investigação.

Manipulação manual da esfera, observações a “olho nu”

Numa primeira fase de testes utilizámos uma esfera de ferro e movimentámo-la manualmente para verificar quantas vezes a esfera caía na zona da órbita por nós pretendida. Realizámos esta experiência muitas vezes para que pudessemos concluir que numa percentagem superior a 70% a esfera caía do lado da órbita mais próxima do foco.

A partir desta situação concluímos que poderíamos avançar, pois estávamos no bom caminho. Seguidamente tentámos verificar se a “olho nu” conseguíamos saber que a velocidade da esfera aumentava junto ao foco e diminuía do outro lado da elipse. Embora essa diferença fosse pequena, devido às dimensões do dispositivo pareceu-nos poder afirmar que a situação atrás descrita era observável.

As filmagens

Para que pudéssemos passar à análise dos dados era preciso recorrer a filmagens dos movimentos das esferas ao longo da trajectória. Numa primeira fase filmámos 10 movimentos de cada uma das três esferas diferentes por nós utilizadas (ferro, vidro e madeira). Estas esferas tinham sensivelmente o mesmo diâmetro.

Numa segunda fase arranjámos esferas de ferro e de vidro de vários diâmetros e filmámos mais 10 movimentos de cada esfera.

Para estas filmagens utilizámos uma câmara Canon 101 que invertemos sobre um suporte de modo a que se conseguisse apanhar toda a órbita (figura 43).



Figura 45 – Suporte e dispositivo para as filmagens

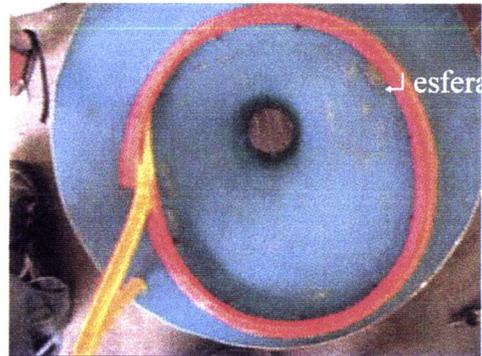


Figura 46 – Filmagem da esfera de ferro.

A recolha dos dados

Durante as filmagens a câmara ia registando o tempo decorrido e ia também gravando as várias marcas, para que posteriormente pudéssemos realizar cálculos.

Para tal utilizámos o programa de tratamento de imagem *Vídeo Edit Magic 4.2*. Este software vai permitir desfragmentar as imagens de modo a que os cálculos de espaço percorrido e de tempo decorridos se tornem mais fáceis de analisar.

O tratamento e sistematização de dados.

Apenas por uma questão prática vamos realizar os cálculos para cada nível de ensino com as mesmas 3 esferas (uma de vidro, uma de ferro e outra de madeira). Em termos da análise de uma volta completa da esfera à elipse iremos sempre considerar a segunda volta, pois parece-nos que será a mais indicada, já existe algum afastamento da calha, reduzindo assim a sua influência.

A nível do 3º ciclo de Ensino Básico vamos apenas calcular a rapidez média do movimento.

Quanto ao Ensino Secundário iremos calcular a velocidade média do movimento, a velocidade média do troço mais perto do foco e também a do troço mais afastado para podermos comparar os valores. Não focaremos a aceleração uma vez que necessitaríamos de velocidades instantâneas e o programa de que dispomos não nos permite calculá-las, mas apenas permite o cálculo de velocidades médias. Calcularemos ainda a aceleração centrípeta quando a esfera descreve a primeira volta aquando da sua queda pelo orifício do protótipo.

3º Ciclo do Ensino Básico

Para tentar explicar o conceito de trajectória e de rapidez média podemos utilizar o nosso aparato experimental. Definindo a trajectória como *“a linha imaginária que indica as sucessivas posições ocupadas por um corpo no decorrer do tempo”*⁶⁵. Podemos solicitar aos alunos que desenhem a trajectória que as esferas descrevem.

Para introduzir o conceito de rapidez média podemos explicar que a mesma se calcula dividindo o espaço percorrido por um corpo pelo intervalo de tempo que o corpo demorou a percorrer o espaço.⁶⁶ Mostrando posteriormente o filme os alunos deverão concluir que neste caso o espaço está representado em *cm* e que o tempo está

⁶⁴ Retirado de Rodrigues, 2002, pág.77.

⁶⁵ Retirado de idem, pág. 76.

representado em s . Deve depois informá-los que neste caso o tempo já se encontra em unidades S. I., mas que o espaço não, pois a unidade S. I. para espaço é o m e não o cm .

Vamos então retirar valores do programa de tratamento de imagem para podermos realizar os nossos cálculos. O valor do espaço percorrido é o perímetro da elipse, pode ser medido com o auxílio de um cordel, e como é lógico é um valor fixo (111,2 cm).

Por uma questão de sistematização dos mesmos iremos recolhê-los sobre a forma de tabela.

Tabela 2: Registos de espaço e tempo das 3 esferas.

	Espaço percorrido (cm)	Tempo inicial (s)	Tempo final (s)	Intervalo de tempo (s)
Esfera 1	111,2	1,600	3,480	1,880
Esfera 2	111,2	2,270	5,120	2,850
Esfera 3	111,2	0,660	2,190	1,530

Para efectuar os cálculos temos que reduzir os cm a m , e então temos:

$$\text{espaço percorrido} = 111,2 \text{ cm} = 1,112 \text{ m}$$

Temos também que saber que o intervalo de tempo se calcula subtraindo o tempo final ao tempo inicial.

Esfera 1 (ferro)

$$\text{rapidez média} = \frac{\text{espaço percorrido}}{\text{intervalo de tempo}}$$

$$\text{rapidez média} = \frac{1,112}{1,880} \qquad \text{rapidez média} = 0,591 \text{ m/s}$$

Esfera 2 (vidro)

$$\text{rapidez média} = \frac{\text{espaço percorrido}}{\text{intervalo de tempo}}$$

$$\text{rapidez média} = \frac{1,112}{2,850} \qquad \text{rapidez média} = 0,390 \text{ m/s}$$

Esfera 3 (madeira)

$$\text{rapidez média} = \frac{\text{espaço percorrido}}{\text{intervalo de tempo}}$$

$$\text{rapidez média} = \frac{1,112}{1,530} \qquad \text{rapidez média} = 0,727 \text{ m/s}$$

Destes resultados podemos concluir que as 3 esferas descrevem a sua segunda volta do movimento elíptico com velocidades diferentes. Podemos afirmar que a mais rápida é a esfera de madeira e a menos rápida a esfera de vidro.

Ensino Secundário

Partindo do conceito de rapidez média podemos chegar ao conceito de velocidade média, este um pouco mais elaborado. Enquanto o conceito de rapidez média se baseia numa grandeza escalar o conceito de velocidade média é uma grandeza vectorial. Essencialmente o que muda é o espaço percorrido (grandeza escalar) para o vector deslocamento (grandeza vectorial)⁶⁷. Esta diferença assenta no facto do deslocamento já pressupor uma direcção e um sentido, características de grandezas vectoriais.

Neste caso concreto como estamos a estudar um movimento que se realiza sempre na mesma direcção e sentido o valor da rapidez média é igual ao valor da velocidade média do movimento, já calculado atrás. Assim:

Esfera 1 (ferro)

$$\text{velocidade média} = \frac{\text{deslocamento}}{\text{intervalo de tempo}}$$

⁶⁷ Retirado de Bello (2004), pág. 20.

$$\bar{v}_m = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad \text{velocidade média} = 0,591 \text{ m/s}$$

Esfera 2 (vidro)

$$\text{velocidade média} = \frac{\text{deslocamento}}{\text{intervalo de tempo}}$$

$$\bar{v}_m = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad \text{velocidade média} = 0,390 \text{ m/s}$$

Esfera 3 (madeira)

$$\text{velocidade média} = \frac{\text{deslocamento}}{\text{intervalo de tempo}}$$

$$\bar{v}_m = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad \text{velocidade média} = 0,727 \text{ m/s}$$

Para tentarmos provar que a velocidade média do troço próximo do foco é superior à velocidade média no troço mais afastado do foco, vamos fazer novos registos e novos cálculos. Estes troços são ambos do mesmo comprimento, medindo 10 cm.

Tabela 3: Registos de Δr e Δt , para as 3 esferas.

	Δr (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (s)
		Perto do foco	Longe do foco
Esfera 1	10	0,150	0,206
Esfera 2	10	0,220	0,330
Esfera 3	10	0,160	0,250

Temos que converter os 10 cm em m (unidade S. I.). Então temos que a distância entre os dois pontos do percurso, referente aos dois troços é igual e vale 0,1 m.

Esfera 1 (ferro) – perto do foco

$$\text{velocidade média} = \frac{\text{deslocamento}}{\text{intervalo de tempo}}$$

$$\bar{v}_m = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

$$v_m = \frac{0,1}{0,150}$$

$$v_m = 0,667 \text{ m/s}$$

Longe do foco

$$v_m = \frac{0,1}{0,206}$$

$$v_m = 0,485 \text{ m/s}$$

Esfera 2 (vidro) – perto do foco

$$\text{velocidade média} = \frac{\text{deslocamento}}{\text{intervalo de tempo}}$$

$$\bar{v}_m = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

$$v_m = \frac{0,1}{0,220}$$

$$v_m = 0,455 \text{ m/s}$$

Longe do foco

$$v_m = \frac{0,1}{0,330}$$

$$v_m = 0,303 \text{ m/s}$$

Esfera 3 (madeira) – perto do foco

$$\text{velocidade média} = \frac{\text{deslocamento}}{\text{intervalo de tempo}}$$

$$\bar{v}_m = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

$$v_m = \frac{0,1}{0,160}$$

$$v_m = 0,625 \text{ m/s}$$

Longe do foco

$$v_m = \frac{0,1}{0,250}$$

$$v_m = 0,400 \text{ m/s}$$

Para sistematizar os dados anteriores são apresentados numa tabela:

Tabela 4: Registos de velocidade média e aceleração centrípeta.

	r (m)	Velocidade média (m/s)		r (m)	Aceleração centrípeta (m/s ²)
		Foco + próximo	Foco + afastado		
Esfera 1	0,10	0,667	0,485	0,49	176,9
Esfera 2	0,10	0,455	0,303	0,49	110,3
Esfera 3	0,10	0,625	0,400	0,49	230,7

Podemos verificar, embora não concluir, pois para podermos afirmar esta evidência seria necessário fazer estes cálculos milhares de vezes e estudá-los estatisticamente de modo a que esta constatação se pudesse transformar em conclusão. Tal com já tínhamos afirmado anteriormente este facto já nos tinha parecido visível a olho nu, constatamo-lo agora também através dos cálculos. Relativamente à massa não há conclusão, uma vez que o protótipo não permite atingir resultados sobre atracção entre duas massas.

Podemos calcular a aceleração centrípeta através da fórmula:

$$a_c = \omega^2 r, \text{ em que:}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ }^{68}$$

⁶⁸ De acordo com Ventura (2005), pág. 154.

Para que tal aconteça necessitamos apenas de saber o raio da circunferência (no orifício) e o tempo que cada esfera demora a descrever essa circunferência (o período). Esta fórmula pode utilizar-se porque vamos considerar a esfera como uma partícula, redução do corpo a um ponto, onde não existe rotação. O raio da circunferência é um valor constante e vale 4,9 cm, que mais uma vez se tem que reduzir a *m* (unidade S. I.), valendo neste caso 0,49 m.

Tabela 5: Registos para cálculo da aceleração centrípeta das 3 esferas.

	r (m)	Intervalo de tempo (s)
Esfera 1	0,49	0,330
Esfera 2	0,49	0,420
Esfera 3	0,49	0,290

Esfera 1 (ferro)

$$a_c = \omega^2 r$$

$$\omega = \frac{2\pi}{\Delta t}$$

$$\omega = 19,0 \text{ rad/s}$$

$$a_c = 19^2 \times 0,49 = 176,9 \text{ m/s}^2$$

Esfera 2 (vidro)

$$a_c = \omega^2 r$$

$$\omega = \frac{2\pi}{\Delta t}$$

$$\omega = 15,0 \text{ rad/s}$$

$$a_c = 15^2 \times 0,49 = 110,3 \text{ m/s}^2$$

Esfera 3 (madeira)

$$a_c = \omega^2 r$$

$$\omega = \frac{2\pi}{\Delta t}$$

$$\omega = 21,7 \text{ rad/s}$$

$$a_c = 21,7^2 \times 0,49 = 230,7 \text{ m/s}^2$$

Tal como era previsível à esfera que corresponde uma maior velocidade média, também corresponde a maior aceleração centrípeta. A sequência das 3 esferas é igual, o que se compreende em termos físicos, pois se existe uma maior velocidade média, deverá corresponder uma maior aceleração resultante dessa mesma velocidade.

Outras filmagens realizaram-se com duas marcas diferentes em duas zonas da elipse. Essas marcas foram colocadas de modo a que correspondessem ao varrimento de duas áreas iguais da elipse, neste caso as áreas mediam **90 cm²**. As áreas foram calculadas por aproximação e da seguinte forma:

- o quanto à área mais perto do foco imaginámo-la como um trapézio, cujas dimensões seriam **15 cm** (base maior), **9 cm** (base menor) e **7,5 cm** (altura). Com estas dimensões calculámos a área através da fórmula:

$$\text{áreidotrapézio} = \frac{(B + b) \times h}{2}$$

$$\text{área do trapézio} = \mathbf{90 \text{ cm}^2}$$

- o quanto à área mais longe do foco imaginámo-la como um triângulo. Já conhecíamos a área que pretendíamos e também a altura do triângulo (**18 cm**), tínhamos apenas que determinar o valor da base do mesmo.

$$\text{Calculámos o valor através da fórmula: } \text{áreadotriângulo} = \frac{bxh}{2}, \text{ ficámos}$$

então a saber que a base do nosso triângulo teria que ter **10 cm**.

Seguidamente, com o auxílio do programa de vídeo (Video Edit Magic 4.2.) verificámos o tempo que as 3 esferas demoraram a percorrer as duas áreas (próxima e longe do foco da elipse), de modo a tentarmos demonstrar qualquer conclusão próxima da segunda lei.

Tabela 6 – Registos de intervalos de tempo do varrimento das duas áreas.

	Intervalo de tempo	Intervalo de tempo
	(s)	(s)
	Área 1	Área 2
Esfera 1	0,160	0,156
Esfera 2	0,240	0,233
Esfera 3	0,120	0,116

Estes resultados são bastante elucidativos, pois o valor de tempo para os dois varrimentos é muito próximo para cada uma das esferas. Estes valores tornam-se ainda mais interessantes devido ao facto da elipse do protótipo não ser muito grande e os cálculos dos valores das áreas tenderem para valores aproximados.

Conclusão

Após muitos meses de trabalho de pesquisa, bem como no desenvolvimento do nosso protótipo, podemos afirmar que os objectivos traçados foram atingidos. Pensamos que com o uso do nosso dispositivo os alunos irão conseguir visualizar de forma clara a primeira e segunda leis de Kepler.

No caso da primeira lei ou lei das órbitas, *a órbita de um planeta é elíptica, ocupando o Sol o foco da elipse*⁶⁹, esta é facilmente visível observando a estrutura do protótipo e analisando o movimento da esfera.

Quanto à segunda lei ou lei das áreas, *o vector posição do planeta, com origem no Sol, «varre» áreas iguais em intervalos de tempo iguais*⁷⁰, consegue provar-se através de cálculos usando o software de tratamento de imagem (Vídeo Edit Magic 4.2.). Como se demonstra nos registos da tabela 6.

A terceira lei ou lei dos períodos, *o cubo do semi-eixo maior da elipse e o quadrado do período do movimento do planeta são directamente proporcionais, o que*

⁶⁹ Retirado de Ventura, 2005, pág.142.

⁷⁰ Retirado de idem.

pode exprimir-se por: $K = \frac{R^3}{T^2}$ (sendo K constante para todos os planetas do sistema solar)⁷¹, é de muito difícil demonstração através do nosso dispositivo experimental, mas pode observar-se no sítio astro.if.ufrgs.br/Orbit/orbits.htm.

⁷¹ Retirado de *ibidem*.

Conclusão

Em termos históricos, parece-nos de extrema importância realçar que após os estudos de Kepler, o céu começou a ser visto com “outros olhos”. Durante quase toda a sua vida vigora o paradigma Geocêntrico, embora Copérnico e Galileu, o tenham feito “tremar”. Existem outros contemporâneos, vindos de outras “ciências” que, também começam a desacreditar o Geocentrismo. No seu tempo não é dado a Kepler o real valor e a sociedade da altura parece não se aperceber da transição importantíssima entre paradigmas. O Heliocentrismo torna-se então Paradigma dominante com Johannes Kepler, que esclareceu a comunidade de que o seu objectivo enquanto estudioso, era provar o mecanismo de relógio existente no Universo e não olhá-lo mais como organismo divino.

Constatamos também que, durante toda a sua vida, que não foi nada fácil, parece que existiam coincidências quase “divinas” que o fizeram deambular pela Europa e que essas deambulações foram, quase sempre motivos de sucesso e novas hipóteses para voltar a estudar e tentar provar o que tinha proposto ainda bem novo, pouco depois de sair de Tuebingen.

Kepler desde muito cedo sabia o que queria provar, e a sua vida pautou-se por essa busca incessante, no meio de conflitos sociais e políticos, onde ele passou de protegido a perseguido, mas estes factos nunca o afastaram dos seus objectivos.

Parece-nos também importante realçar que, como ele considerava Deus um excelente “Geómetra”, e na altura ainda não haveria toda a matemática de suporte às suas equações, ele consegue chegar à órbita de Marte através da Geometria e não utilizando os seus exaustivos cálculos matemáticos.

Do ponto de vista estritamente científico, Kepler é sem dúvida o primeiro espírito do seu tempo. Ele une a algum génio matemático, uma excelente visão de pensamento para além da época em que viveu e abre definitivamente as portas a uma nova Astronomia. É incrível porém que em termos filosóficos ele esteja bem mais “colado” a Aristóteles, do que aos seus contemporâneos Galileu ou Descartes, uma vez que, para Kepler o movimento e o repouso são “entes” completamente antagónicos.

Numa perspectiva didáctico-pedagógica, procurámos alguns trabalhos e artigos publicados sobre o tema no âmbito concreto do ensino e aprendizagem das leis e

descobrimos pouca coisa, o descoberto é descrito ao longo do capítulo três, contribuindo dentro do possível para a construção do capítulo da nossa perspectiva de abordagem do tema no ensino. Ao longo do capítulo propomos várias abordagens do assunto “leis de Kepler” desde o 7º ano até ao 12º ano de escolaridade. Indicamos também bastantes propostas de interligação entre as várias disciplinas, preconizando a perspectiva CTS lançada por estas novas abordagens dos vários conteúdos. Sugerimos inclusive estratégias de actuação para as NAC. Abordam-se também aqui algumas propostas para a disciplina de Área de Projecto de 12º ano que apenas começará a ser leccionada no ano lectivo 2006-2007.

Por fim, desenvolvemos então o **protótipo experimental** e tentar retirar algumas conclusões da sua utilização. Descrevemos ao longo do capítulo as tentativas que tivemos que fazer de modo a que criássemos da melhor forma possível o nosso dispositivo experimental. Este foi construído partindo de um pressuposto, mas foi sendo desenvolvido com base na tentativa e erro.

Foi um processo que passou por vários constrangimentos, demorou cerca de um ano a ser concluído, mas que no final nos mostra que a persistência valeu a pena. Construámos algo de novo que pode vir a ser utilizado pelos nossos alunos em sala de aula e noutros contextos que nos venham a parecer úteis, de forma a rentabilizarmos da melhor forma possível a existência deste novo protótipo experimental. Após muitos meses de trabalho de pesquisa, bem como no desenvolvimento do nosso protótipo, podemos afirmar que os objectivos traçados foram atingidos. Pensamos que com o uso do nosso dispositivo os alunos irão conseguir visualizar de forma clara a primeira e segunda leis de Kepler.

Trabalho Futuro

Quanto à **pesquisa histórica** e ao desenvolvimento de textos com interesse pedagógico, podemos sugerir que se tentem melhorar os que foram criados e que se criem outros para os diferentes níveis de ensino. Esta situação parece-nos fulcral para a aprendizagem dos conceitos em ciência, sem esquecermos o “ambiente histórico-filosófico” da altura em que surgiram. Neste contexto do observar os céus é de extrema importância toda a envolvência histórica, pois há “detalhes mínimos” que obrigam a que o curso da história vá para aquele lado e não para o outro. Esses detalhes são essenciais para a formação de um construto válido sobre o tema. As situações de interdisciplinaridade também podem ser mais estudadas e aprofundadas.

Em relação ao **protótipo experimental** por nós construído, agora que já foi dalguma forma explorado, pode e deve ser melhorado em diversos aspectos:

- A dimensão pode ser um pouco maior para facilitar algumas observações;
- Neste caso o declive poderá ser melhor calculado e definido de modo a que toda a performance das esferas em movimento melhore;
- Podemos tratar os dados com um programa mais eficaz em termos de descrição da trajectória e cálculos, de nome Videopoint (Lenox software, Estados Unidos da América), que sistematicamente vai tendo actualizações;
- Tentar estudar uma maneira de reduzir um pouco mais o atrito da superfície do protótipo;
- Executar um número elevado de cálculos fazendo variar a dimensão das esferas e também o material de que são feitas, para tentarmos chegar a situações onde o atrito seja mais facilmente desprezável;
- Estudar a melhor forma de conseguir uma maneira para também com alguma facilidade tentar visualizar a terceira lei (lei dos períodos).

Esta situação deverá vir a ocorrer com um concurso a um projecto Ciência Viva a nível de escola, pois o trabalho da nossa tese não foi financiado. A sua melhoria envolve, com certeza, o uso de algumas verbas que na maior parte das vezes, as escolas não possuem. Nesta candidatura será necessário adquirir o software Videopoint, uma câmara de vídeo, várias esferas de materiais diferentes e de diferentes dimensões, bem

como todo o material necessário à reformulação do protótipo, ou até mesmo à construção de um novo dispositivo.

Parece-nos de extrema importância deixar em aberto a possibilidade de poder no futuro ser estudado o impacto destas nossas sugestões na aprendizagem efectiva destes conceitos. Para além da aprendizagem será também importante verificar se estas abordagens têm também repercussões claras a nível da motivação dos nossos alunos para a aprendizagem das Ciências em geral e da Física em particular. Este estudo poderia ser desenvolvido como um estudo de caso. Por exemplo, acompanhar uma turma de 3º ciclo em que o professor tivesse este tipo de abordagem e outra em que o mesmo não acontecesse. Alguns anos mais tarde voltar a acompanhar as mesmas turmas, agora já no ensino secundário e verificar outra vez como o processo de aprendizagem e motivação se estava a desenvolver. A partir destes dados tentar tirar algumas conclusões, podendo vir a provar ou não, que estes tipos de abordagens melhoram os processos de motivação e aprendizagem destes conceitos.

Como se trata de uma dissertação sobre Kepler, parece-nos importante referir que já ele achava que a ciência se desenvolvia pelo processo da tentativa e do erro, e que tudo o que se fosse fazendo nesse sentido deveria ser exposto. Não deveríamos recear expor os nossos fracassos pois estes tinham levado a concluir qualquer coisa de correcto. Mesmo que “deitássemos fora” muito mais situações do que as que aproveitássemos é de extrema importância que tal aconteça. Kepler vinca bem esta posição quando afirma o seguinte:

As ocasiões nas quais os homens adquiriram um conhecimento dos fenómenos celestes não são menos admiráveis que as próprias descobertas... Se se desculpa a Cristóvão Colombo, a Magalhães, aos Portugueses, que eles narrem as suas divagações, se desejamos mesmo que essas passagens não sejam omitidas, e perderíamos todo o prazer se o fossem, não me acusem de fazer o mesmo. Kepler⁶¹

Essas serviriam com certeza para que outros não seguissem caminhos sinuosos e tortuosos quando quisessem investigar algo. Nós também assumimos um pouco esta

⁶¹ Citado por Fiolhais (1991), pág. 63.

postura ao longo do nosso trabalho e fomos aprendendo sempre com os nossos erros e esperando que outros também venham a aprender.

Bibliografia

- Araújo, M.** (2003). Apontamentos de Mecânica Teórica, capítulo 8. Universidade de Évora, Évora. 21 páginas.
- Balibar, F.** (1984). Einstein: uma leitura de Galileu a Newton. Edições 70, Lisboa. (trabalho original em francês, publicado em 1984). 126 páginas.
- Bello, A e Caldeira, H.** (2004). Ontem e hoje. Física e Química A, Física 11º ano. Porto Editora, Porto. 240 páginas.
- Bridges, R.** (1995). Fitting planetary orbits with a spreadsheet. *Physics Education*, 30, 266-271.
- Bridges, R.** (1995). Fitting orbits to Jupiter's moons with a spreadsheet. *Physics Education*, 30, 271-276.
- Bryson, B.** (2005). Breve história de quase tudo. Quetzal editores, Lisboa. (trabalho original em americano, publicado em 2003). 495 páginas.
- Bucher, M.** (1998). Kepler's third law: equal volumes in equal times. *The Physics Teacher*, 36, 212-214.
- Butikov, E. I.** (2003). Families of Keplerian orbits. *European Journal of Physics*, 24, 175-183.
- Caldeira, H.; Martins, I.; Bello, A.; Costa, J. A.; San-Bento, C.; Lopes, J. M.; Pina, E.; Simões, M. O.; Simões T. S.** (2003). Programa de Física e Química A, 11º e 12º anos. Ministério da Educação, Direcção Geral de Inovação e Desenvolvimento Curricular, Lisboa. 98 páginas.

Carvalho, R. (1997). *Colectânea de estudos históricos (1953-1994)*. Universidade de Évora, Évora. xxi + 538 páginas.

Ferguson, K. (2002). *Tycho and Kepler, the strange partnership that revolutionised astronomy*. Review, Londres. 399 páginas.

Fiolhais, C. (1991). *Física divertida*. Publicações Gradiva, Lisboa. 211 páginas.

Fiolhais, C. Paiva, J. (1993). *Programa para computador Kepler*. Departamento de Física da faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra. Disponível no sítio: www.cienciaviva.pt

Fiolhais, M; Cardoso, E.; Ventura, G.; Paixão, J.; Sousa, M. C.; Nogueira, R. (2004). *Programa de Física 12º ano*. Ministério da Educação, Direcção Geral de Inovação e Desenvolvimento Curricular, Lisboa. 94 páginas.

Galvão, C.; Neves, A.; Freire, A. M.; Lopes, A. M.; Santos, M. C.; Vilela, M. C.; Oliveira, M. T.; Pereira, M. (2001). *Programa de Ciências Físicas e Naturais, 3º Ciclo do Ensino Básico*. Ministério da Educação, Direcção Geral de Inovação e Desenvolvimento Curricular, Lisboa. 39 páginas.

Gingerich, O. Hartner, W; Kulikovsky, P. G.; Rybke, E.; Whitrow, G.; Cohen, I.; Horky, Z.; Needham, J.; Pederson, O.; Taton, R. (1989). *The General History of Astronomy*. Volume 2, parte A. Cambridge University Press, Cambridge. 274 páginas.

González-Villanueva, A. (1998). *From circular paths to elliptic orbits: a geometric approach to Kepler's motion*. *European Journal of Physics*, 19, 431-438.

Grande Enciclopédia Universal (2004). Volume 13, p. 8314. Durclub, S.A. Edição em exclusivo para o Correio da Manhã, Lisboa.

- Hübner, K.** (1993) *Crítica da razão científica*. Edições 70, Lisboa. (trabalho original em alemão, publicado em 1978). 279 páginas.
- Janeira, A. L.** (1985). *Filosofia das ciências, faces e interfaces de uma disciplina*. *Revista Portuguesa de Filosofia*, tomo XLI, Braga.
- Koiré, A.** (1992). *Estudos Galilaicos*. Publicações D. Quixote, Lisboa. (trabalho original em francês, publicado em 1966). 426 páginas.
- Kuhn, T. S.** (2001). *A estrutura das revoluções científicas*. Editora perspectiva, Lisboa. (trabalho original em inglês, publicado em 1961). 257 páginas.
- Locqueneux, R.** (1989). *História da Física*. Publicações Europa-América, Lisboa. (trabalho original em francês, publicado em 1987). 153 páginas.
- Maury, J. P.** (1992). *Newton e a mecânica celeste*. Civilização, Lisboa. (trabalho original em francês, publicado em 1990). 144 páginas
- Mourão, R.** (2003). *Kepler, a descoberta das leis do movimento planetário*. Dysseus Editora, São Paulo. 241 páginas.
- Neves, M. C. D.** (1986). *Astronomia de Régua e Compasso, de Kepler a Ptolomeu*. Universidade de Campinas, Campinas. Tese de mestrado. 227 páginas.
- Noll, E. D.** (1996). Kepler's third law for elliptical orbits. *The Physics Teacher*, 34, 42-43.
- Noll, E. D.** (2002). Teaching Kepler's laws as more than empirical statements. *Physics Education*, 37, 245-250.
- Oppenheimer, J. R.** (1954). *Ciência e Saber Comum*. Livros do Brasil, Lisboa. (trabalho original em inglês, publicado em 1953). 167 páginas.

Parisi, A. (2005). *Asas, maçãs e telescópios: a revolução científica*. Principia, Estoril. (trabalho original em italiano, publicado em 2003). 191 páginas.

Parisi, A. (2005). *Números mágicos e estrelas errantes: os primeiros passos da ciência*. Principia, Estoril. (trabalho original em italiano, publicado em 2001). 190 páginas

Projecto Física (1978). *Unidade 2: movimento nos céus*. Edição Portuguesa coordenada por Maria Odete Valente. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. (trabalho original em Inglês, publicado em 1970). 210 páginas.

Reeves, H. (1992). *Um pouco mais de azul: a evolução cósmica*. Gradiva, Lisboa. (trabalho original em francês, publicado em 1981). 257 páginas.

Rodrigues, M. e Dias, F. (2002). *Ciências na nossa vida, terra no espaço*. Ciências Físico-Químicas, 3º ciclo. Porto Editora, Porto. 129 páginas.

Romanovskis, T. (2004). Comment on “Families of Keplerian orbits”. *European Journal of Physics*, 25, 17-19.

Serres, M. (1995). *Elementos para uma história das ciências. Do fim da Idade Média a Lavoisier*. Michel Serres (direcção) II volume. Terramar, Lisboa. (trabalho original em francês, publicado em 1986). 146 – 211.

Shapin, S. (1999). *A revolução científica*. Difel, Lisboa. (trabalho original em americano, publicado em 1996). 227 páginas.

Silva, L. P. (1943). *Obras Completas*. 3 volumes. Agência Geral das Colónias. Lisboa.

Thomas, H e Thomas D. L. (1953). *Grandes Cientistas*. Livros do Brasil, Lisboa. (trabalho original em inglês, publicado em 1951). 283 páginas.

Topa, P. (2004). *As leis de Kepler, o Sistema Solar e a astronomia: uma perspectiva de ensino integrado com a Matemática*. Universidade do Minho, Braga.

Topper, D. (1991). Kepler's other "law" of planetary motion. *European journal of Physics*, 12, 49-50.

Valadares, J. A. (2005). Da história da ciência ao ensino da ciência: o exemplo clarificador da construção da teoria da relatividade restrita. Consultado na página www.blues.uab.es.

Ventura, G.; Fiolhais, M.; Fiolhais, C. e Paixão, J. (2005). 12 F. Física, 12º ano. Texto Editora, Lisboa. 399 páginas.

Videira, A. L. (2002). Apontamentos da disciplina de História das Ciências. Universidade de Évora, Évora. 28 páginas.

Webografia

A webografia é colocada pela ordem que os sítios e/ou as páginas vão aparecendo citadas ao longo da tese.

- ◆ www.ualg.pt/ccviva/astronomia/historia/johannes_kepler.htm
- ◆ www.ualg.pt/.../historia/galileu_galilei.htm
- ◆ www.elasere.com/interes/showfrases.asp?id=71&exist=yes
- ◆ br.geocities.com/salafisica9/biografias/brahe.htm
- ◆ www.brathair.outonos.com
- ◆ www.instituto-camoes.pt/cvc/ciencia/e20b.html
- ◆ www.cienciaviva.pt/latlong/anterior/nonio3.asp
- ◆ www.milfontes.net/images/relogio_igreja.jpg
- ◆ www.casalperfeito.com.br/fotos/davinci1.jpg
- ◆ educar.sc.usp.br/licenciatura/2000/gravitacao/leisdeKepler.htm
- ◆ www.geocities.com/CapeCanaveral/Hall/1018/fisica.html
- ◆ www.blues.uab.es
- ◆ astro.if.ufrgs.br/Orbit/orbits.htm
- ◆ www.pavconhecimento.pt/exposicoes/modulos/index.asp?acao=showmodulo&id_exp_modulo=162&id_exposicao=6
- ◆ www.colegiosaofrancisco.com.br
- ◆ www.andrews.edu/~calkins/math/biograph/biokeplr.htm
- ◆ kepler.nasa.gov/johannes/
- ◆ www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/Biographies/Kepler.html
- ◆ www.instituto-camoes.pt/cvc/bvc/astromialusidas

Anexos

Anexo A

Proposta de trabalho entregue a dois alunos do 8º ano de escolaridade com a intenção de serem produzidas de forma independente duas histórias que contassem a “história” de Kepler e pudessem ser utilizadas em sala pelo seu interesse pedagógico.

Objectivos:

- Escrever um texto em forma descritiva ou em forma de diálogo sobre a vida e a primeira lei de Kepler;

Metodologia de trabalho proposta:

- Esse texto é para ser utilizado em aulas do sétimo ano de escolaridade;
- Pretende-se que seja de fácil leitura e que desperte interesse e curiosidade sobre factos da vida do astrónomo;
- Devem apenas escrever depois de ler com atenção as informações anexas;
- Deve ser batido a computador e deve ocupar no máximo 1,5 páginas A4.

Uma possível história de Kepler *(recolha para consulta)*

Kepler nasceu a 27 de Dezembro de 1571, sendo o primeiro filho de Heinrich Kepler e de Katherine Guldemann. Foi sempre uma criança franzina e muito doente, o que veio a condicionar a sua vida escolar.

Os pais não tinham dinheiro e ele acaba por ir viver para casa dos avós, onde inicia a sua escolaridade. Em 1578 iniciou a escola elementar em alemão, como o professor percebeu que se tratava de um jovem com grande potencial, resolveu orientá-lo para uma escola latina. Aos treze anos fez exame de bacharel com enorme sucesso e mostrou vontade de ingressar no seminário para seguir uma carreira religiosa. Em 16 de Outubro de 1584 ingressa no seminário de Adelberg, dois anos mais tarde passa para o

seminário de Maulbronn e a 3 de Setembro de 1588 passa no exame de admissão à Universidade de Tuebingen, onde ingressa a 17 de Setembro de 1589. Até 1593 estuda nesta Universidade, onde para além da Teologia, se apaixona pela cadeira de Matemática e Astronomia. Após a Universidade onde obteve notas brilhantes foi convidado para ser professor de Matemática no seminário protestante de Graz, capital da Estíria (actual Áustria), onde chega a 11 de Abril de 1594. O seu primeiro trabalho como astrónomo surge em 1596, com o título abreviado “Mysterium Cosmographicum”. Este trabalho necessitou da autorização da comissão de teologia da Universidade de Tuebingen, e Kepler foi alertado para apenas tratar a teoria heliocêntrica (o Sol era o centro do Universo e os planetas giravam à sua volta) como mera hipótese matemática. Kepler tentou fazê-lo mas, ao longo do seu livro aparecem descrições de uma astronomia nova, a astronomia defendida por Copérnico. Nesta altura a igreja impunha as suas leis e o sistema defendido era o geocêntrico (a terra era o centro do Universo e os outros planetas moviam-se à sua volta).

Nesta altura Kepler ouvia falar muito de Tycho Brahe e respeitava-o muito enquanto observador minucioso dos céus. Embora Kepler soubesse que Tycho defendia um sistema entre o de Ptolomeu e o de Copérnico, (ao redor da Terra e da Lua girava o Sol, em torno do qual giravam os outros 5 planetas), achava que tinha que ser através dos longos anos de observação e registos do céu, feitos por Tycho, que um dia se provaria a teoria de Copérnico. Salientemos porém o facto de Brahe tentar conciliar o seu “geocentrismo religioso” com o “heliocentrismo observável”, crença religiosa que se veio a demonstrar fatal, pois impediu de ver mais além.

Tycho observa pormenorizadamente os céus ao longo de toda a sua vida e regista tudo o que observa. Durante os movimentos dos dois (Kepler e Brahe), forçados pelas perseguições da igreja acabam por se encontrar e começar a trabalhar juntos em Praga. Já com Kepler perfeitamente integrado em Praga e a trabalhar com Tycho, este adoce e apercebendo-se que vai morrer, designou-o como seu sucessor. No dia 6 de Novembro de 1601 Kepler foi nomeado matemático imperial pelo Imperador Rodolfo II, voltando Kepler a trazer a sua família à Corte duas gerações depois de ter entrado em declínio.

A partir daqui Kepler dedica-se a estudar tudo o que Brahe tinha registado. Neste período extremamente fértil da sua vida, cria duas novas ciências: a Óptica Instrumental e a Astronomia Física, precursora da Mecânica Celeste. Publica nos mais

diversos campos (Astrologia, Astronomia, Óptica,...). A sua companhia era disputada por todos os intelectuais que tinham a protecção do Imperador de Praga.

Em 1605, quando estudava a trajectória de Marte, descobre que as órbitas planetárias não eram circulares, mas sim elípticas, tendo o Sol, num dos focos da elipse. Esta observação permite-lhe chegar, alguns anos mais tarde, ao enunciado da primeira lei. Durante todo este tempo Kepler percebe que a órbita do planeta não podem ser circular (perfeição já defendida por Aristóteles e que nesta altura ainda é defendida pela Igreja e pelo próprio Galileu), e tenta então realizar cálculos admitindo que a órbita seria oval. Rapidamente se apercebe que a forma oval também teria que ser rejeitada. Nesta fase dos seus cálculos e observações propõem então a si próprio a elipse, como a próxima forma da órbita de Marte. Esta proposta causa-lhe muitíssimas preocupações, pois punha em causa toda a sua educação religiosa.

Abandona então o círculo ptolomaico, e apercebe-se que a ovalização da trajectória proposta por Copérnico e por Brahe também não serviria para coincidir com as suas novas descobertas. Também pela sua crença religiosa era muito difícil abandonar o modelo circular, ainda faz cálculos e cálculos por mais três anos, findos os quais anuncia que a órbita de Marte terá de ser uma figura oval e não um círculo. Continua a fazer cálculos para chegar à forma ovalada pretendida, e incrivelmente nos cálculos auxiliares foi usando elipses, nunca lhe dando o “clic” que seria essa a forma da órbita.

Não sendo capaz de interpretar a equação decide abandoná-la e tentar chegar à órbita pelo método geométrico, onde conclui que a órbita de Marte seria uma elipse em que o Sol se encontraria num dos focos. Mais uma vez achou que se Marte tinha uma órbita elíptica, também os outros planetas a teriam. Enuncia então a sua primeira lei do movimento planetário:

“A órbita de um planeta é uma elipse estando o Sol situado num dos focos”.

Kepler continua a investigar os astros ainda por vários anos registando ainda mais duas leis dos movimentos dos planetas. Nos últimos anos da sua vida Kepler passa a ser o astrólogo oficial de Albrecht Wallenstein, chefe de guerra, que teria sido recompensado pelas suas vitórias com o ducado de Sagan, na Silésia. No dia 15 de Novembro de 1630, morre em Regensburg, na Alemanha, durante uma viagem que, tinha como objectivo receber o dinheiro que a Coroa lhe devia.



Anexo B

História criada por uma aluna do 8º ano de escolaridade, com base nas informações por nós fornecidas que constam no anexo A.

“Kepler conversa com o seu botão de punho”

No dia 15 de Novembro de 1630, durante uma viagem à Coroa, Kepler decide conversar com o seu botão de punho (recordação de família), sobre a sua vida. Admirando a paisagem, olha para o botão e diz:

- Eu chamo-me Johannes Kepler e nasci no dia 27 de Dezembro de 1571. Durante a minha infância estive várias vezes doentes o que prejudicou os meus estudos. Como os meus pais não tinham dinheiro fui viver com os meus avós, que me ajudaram na vida escolar. E tu, que contas?

Surpreendentemente, o botão responde:

- Eu sou o teu confidente e estou aqui para ouvir a tua história.

Kepler, embora espantado com a conversa do botão, e pelo facto do botão falar, continua a contar a sua vida.

- Com apenas 13 anos fiz o exame de bacharel com muito sucesso e, a 16 de Outubro de 1584 entrei no Seminário de Adelberg para seguir uma carreira religiosa. Dois anos mais tarde fui para outro seminário e em 1588 entrei para a universidade de Tuebingen. Estudei durante 4 anos nesta universidade e apaixonei-me pelas disciplinas de Teologia, Matemática e Astronomia. Como tive notas brilhantes convidaram-me para professor de matemática.

Interrompendo o entusiasmo de Kepler ao contar toda a sua história, o botão exclama:

- Já vi que na tua vida só aparecem nomes esquisitos! Mas, continua estou a gostar de ouvir!

Incentivado pelo seu confidente, Kepler prossegue:

- Em 1596, publiquei o meu primeiro trabalho como astrónomo, com o título “Mysterium Cosmographium”, depois de ser autorizado pela comissão de teologia da universidade.

- Tiveste mesmo que pedir autorização?

- Sim sabes, neste período da história a Igreja Católica impunha a s suas leis. Defendia o sistema geocêntrico, segundo o qual a Terra era o centro do Universo e os outros astros moviam-se à sua volta.

- E tu, o que defendias?

- No meu livro, defendi uma nova astronomia, defendida por Copérnico, baseada no sistema heliocêntrico, segundo o qual era o Sol o centro d Universo e os outros astros moviam-se à sua volta. Mas, alertado pela universidade, tratei esta teoria apenas com uma mera hipótese matemática.

- Nessa altura, quem eram as pessoas importantes?

-Eu ouvia falar muito de Tycho Brahe e respeitava-o muito enquanto observador dos céus. Achava que as suas contínuas observações, bem como os seus cálculos exaustivos iriam um dia permitir provar a teoria heliocêntrica.

- O que defendia Tycho Brahe?

-Defendia algo entre o geocentrismo e o heliocentrismo. Achava que o Sol girava em torno da Terra e da Lua e os outros cinco planetas giravam à volta do Sol. Brahe tentava conciliar o seu “geocentrismo religioso” com o “heliocentrismo observável”.

- Conta mais, quero saber o que aconteceu a seguir!

- Não tenhas pressa, vou contar-te tudo. Eu e Tycho fomos perseguidos pela Igreja Católica e começámos a trabalhar juntos em Praga. Porém Tycho adoece e antes de morrer designa-me seu sucessor. Depois disso fui nomeado matemático imperial pelo imperador Rodolfo II, e dediquei-me a estudar os registos de Brahe. Este foi um período muito importante da minha vida, publiquei vários trabalhos em diversas áreas e fui o fundador de duas novas “ciências”.

- O que fizeste mais?

- Quando estudava a trajectória de Marte descobri que as órbitas planetárias não eram circulares, mas sim elípticas, e que o Sol se situava num dos focos da elipse. Esta minha descoberta punha em causa tudo em que eu acreditava. Fiz vários cálculos e utilizei o método geométrico para provar o que me parecia correcto. Consigo então concluir que a órbita e Marte era elíptica e portanto dever-se-ia passar o mesmo com os outros planetas.

- Sim, continua por favor!

- Após todas estas descobertas, resolvo então anunciara a minha primeira lei.

- O que dizia essa tua lei?

- Afirmava que a órbita de qualquer planeta é uma elipse, estando o Sol num dos focos dessa elipse. Mais tarde enunciei mais duas leis sobre os planetas...

O botão achou que o entusiasmo tinha cansado demasiado aquele pobre homem.

- O que fazes agora, diz-me e depois descansa, pareces muito cansado!

- Sou o astrólogo oficial de Albrecht Wallenstein. Vou à Corte cobrar uma antiga dívida.

Após o desabafo de toda a sua vida, Kepler olha para fora da carruagem e como se adormecesse, morre num sono profundo. O botão de punho apercebe-se e chora lágrima a lágrima, gota a gota...

Anexo C

História criada por uma aluna do 8º ano de escolaridade, com base nas informações por nós fornecidas que constam no anexo A.

“Kepler conta a sua história”

No ano de 2130, Kepler desloca-se à Lua, porque se comemoravam na Terra 500 anos sobre a sua morte. Resolve daí, contar a história da sua vida aos terráqueos.

Sou Kepler, filho de Heinrich e Katherine, nasci a 27 de Dezembro de 1571. Como a minha família era modesta, tive de ir viver com os meus avós para iniciar a vida escolar. Com 7 anos comecei a escola elementar e fui considerado um menino com grandes potencialidades. Aos 13 anos, fiz o exame de bacharel e obtive grande sucesso, entrando no Seminário de Adelberg.

De seguida, estudei 4 anos na Universidade de Tuebingen, onde para além da Teologia, apaixonei-me pela Matemática e pela Astronomia, onde obtive grandes notas. Seguidamente, fui professor de Matemática nesta Universidade. A Comissão de Teologia da Universidade autorizou o meu trabalho, com a condição de falar da teoria heliocêntrica, como uma simples hipótese matemática. Eu defendia uma astronomia nova baseada na referida teoria, eu acreditava que era o Sol o centro do Universo, e os outros astros giravam à sua volta. Esta teoria também era defendida pelo famoso astrónomo polaco Copérnico.

Kepler cansado da viagem e de ter que falar durante tanto tempo, vai saltitando na Lua, passa pelo “mar da Tranquilidade” e resolve atar umas pedras à cintura para se poder sentar a descansar, junto à bandeira dos EUA. Dormita um pouco e, lembra-se que está a contar a sua história de vida, no dia em que se comemoram os cinco séculos de aniversário sobre a sua morte. Então, embora sentado, continua...

Nos tempos em que vivi, o pensamento e as ideias eram controladas pela Igreja Católica que, defendia uma teoria diferente, desde os tempos de Ptolomeu, a teoria

geocêntrica, defendida ao longo de séculos. Esta afirmava que era a Terra o centro do Universo e que todos os outros astros de orbitavam à sua volta. Para perceberem porque é que eu fui importante, enquanto astrónomo é importante conhecerem Tycho Brahe. Era um astrónomo que eu admirava bastante, e que dedicou toda a sua vida à observação dos céus e a registar tudo o que observava. Brahe defendia um sistema entre o de Ptolomeu e o de Copérnico, pois acreditava que ao redor da Lua e da Terra girava o Sol e em torno deste, os outros 5 planetas. Tycho caiu na asneira de tentar conciliar o seu “geocentrismo religioso” com o “heliocentrismo observável”.

Eu e Brahe, fomos perseguidos pela Igreja por defendermos teorias contra a opinião da própria Igreja e fugimos para Praga. Trabalhámos juntos mas, pouco tempo depois Brahe morreu e eu fui nomeado seu sucessor. Com 30 anos fui nomeado Matemático Imperial por Rodolfo II, e seta fase da minha vida foi muito fértil.

Publiquei vários trabalhos, e dediquei-me arduamente a estudar todos os registos de Tycho. Quando estudava a trajectória de Marte verifiquei que as órbitas descritas pelo planeta não eram circulares, mas sim elípticas.

Esta nova descoberta punha em causa todas as minhas crenças. Para que conseguisse assumir como verdade investi em vários cálculos, utilizei o método geométrico e fiz de tudo para argumentar a minha descoberta.

Como já tinha descansado algum tempo, desatou as pedras e foi saltitando ao longo do planeta. Continuou porém, a contar a sua história que estava a ser escutada no planeta Terra.

Depois de anos e anos de cálculos verifiquei que a órbita que o planeta Marte descrevia era uma elipse, resolvi presumir que as órbitas dos outros planetas também seriam elípticas. Podia então escrever sem qualquer margem de erro a minha primeira lei do movimento dos planetas. Hoje vou dizê-la e demonstrá-la, tornando-me um décimo planeta que orbita entre o vosso e Marte à volta do Sol. Usem os vossos poderosos instrumentos de observação, descendentes da luneta de Galileu e observem o meu movimento, enquanto confirmam o enunciado da minha primeira lei: “a órbita de um planeta é uma elipse, estando o Sol situado num dos focos dessa elipse”.

Vou descansar em paz, informando-os que há precisamente 500 anos, enquanto me deslocava à Corte da altura morri, no mesmo país que me viu nascer, a Alemanha.

Anexo D

Solicitamos este trabalho no âmbito da Tese de Mestrado em Física para o Ensino com o tema “Uma abordagem das leis de Kepler nos Ensinos Básico e Secundário”. Fornecemos aos dois professores e à aluna um resumo dos nossos primeiros dois capítulos da tese, deste resumo abolimos as citações, bem como as fotografias, que vai servir de fonte de consulta para a execução do que lhes é proposto.

Objectivos:

- Construir um pequeno texto/reflexão sobre a vida e obra de Johannes Kepler;

Metodologia de trabalho proposta:

- Devem basear-se nas suas experiências pessoais e profissionais para construir o texto;
- A mesma fonte de consulta vai ser cedida a dois professores (um de Filosofia, e outro de História) e a um aluno a frequentar o 12º ano;
- Pretende-se à posteriori, fazer uma análise crítica dos três textos, de modo a construir um que tenha interesse científico, histórico-filosófico e didático-pedagógico para vir a ser utilizado em aulas de Física de 11º e 12º anos para introduzir o tema “movimentos planetários”;
- Podemos não construir outro texto e apenas utilizar os textos construídos, se verificarmos que em termos de aprendizagem-ensino estes se mostrarem oportunos e relevantes para a abordagem da matéria;
- O texto pode ser uma história entre personagens fictícias, um relato histórico, uma perspectiva de vida, ...;
- O texto não deve exceder as duas páginas A4 batidas a computador, letra 12.

Anexo E

História criada por uma aluna do 12º ano de escolaridade, partindo do resumo por nós fornecido e dos objectivos traçados no anexo D.

“Johannes Kepler”

Johannes Kepler nasceu no dia 27 de Dezembro de 1571 na actual cidade Weil der Stadt, na Alemanha, no seio de uma família pobre mas com antepassados da nobreza. A sua infância foi muito dolorosa e frequentou a escola com pouca regularidade pois pertencia a uma família pobre e sofria de várias doenças. Quando foi viver para Loenberg, em 1576, com os avós a sua sorte mudou um pouco, começou a frequentar a escola e aos treze anos já tinha o bacharel. Ainda entrou no seminário mas 5 anos mais tarde ingressou na Universidade de Tuebingen onde se apaixonou por Matemática e Astronomia devido a um professor que defendia o Sistema Ptolomaico (Teoria Geocêntrica) mas, ensinava de acordo com a Teoria Heliocêntrica de Copérnico. Após a Universidade, foi professor de Matemática em Graaz e nesta época da sua vida, dedicou-se à Astronomia e era calendarista da cidade. Quando ficou sem emprego, dedicou-se à observação celeste e a cálculos para provar a sua ideia de relacionar os 5 sólidos platónicos perfeitos com os 6 planetas que se conheciam na altura.

Em 1596, surgiu o seu primeiro trabalho como astrónomo, onde Kepler evidenciou o seu apoio à Teoria Heliocêntrica, embora disfarçadamente. Esta teoria não era muito bem aceite, devido ao facto de Copérnico se ter referido ao Sol como o centro do Universo, o que foi censurado pela Inquisição. Kepler envia a sua obra a Galileu Galilei e Tycho Brahe, os astrónomos mais importantes da época. Galileu deu-lhe a entender que também era defensor da Teoria Heliocêntrica e Brahe aconselhou-o a dedicar-se à observação celeste. Brahe defendia uma teoria intermédia entre Ptolomeu e Copérnico, talvez porque até as figuras mais importantes da época não se atrevessem a desafiar directamente a igreja.

Os últimos dois anos do século XV foram devastadores para Kepler e este muda-se para Praga, onde está Tycho Brahe. Vai com a esperança de o encontrar pois

sabia que, os seus anos de observações e registos celestes haveriam de ser importantíssimos para si. Brahe e Kepler iniciam então uma investigação conjunta que iria mudar o mundo da Astronomia, o que não era nada fácil na época pois a Teoria heliocêntrica, tal como muitas outras descobertas em astronomia, iam contra os ideais da Igreja Católica e tudo o que esta defendia.

Com a morte de Tycho, Kepler é nomeado seu sucessor e torna-se matemático imperial de Rodolfo II. Inicia-se então um período da sua vida bastante produtivo, no qual Kepler estuda os registos de Brahe, publica em diversos campos e cria a Óptica Instrumental e a Astronomia Física.

Em 1605, enquanto estudava a órbita de Marte, descobre que as órbitas planetárias são elípticas e não circulares (o círculo era símbolo de pureza e perfeição), facto que coloca em causa toda a sua educação religiosa, que merece críticas de todo o mundo científico e que, apesar disso, alguns anos mais tarde, o leva à sua primeira lei:

“A órbita de um planeta é uma elipse estando o Sol situado num dos focos.”

Kepler ao retomar os seus estudos sobre a órbita de Marte consegue libertar-se das ideias pré-concebidas e inova das seguintes formas: desloca o centro do Sistema Solar para o Sol, os planetas descrevem as suas órbitas aproximadamente no mesmo plano e o movimento dos planetas não é uniforme. Ao deparar-se com alguns contratempos na sua teoria, Kepler decidiu estudar a órbita da Terra e, fixando-a no céu, determinou a distância de Marte ao Sol. Verificou que a velocidade a que a Terra se move depende da sua distância ao Sol, concluindo que o movimento dos planetas provém do Sol e que a força que o Sol exerce sobre os planetas é proporcional à velocidade a que os mesmos se deslocam. Para além disto, afirmou que o mesmo se passaria com todos os outros planetas, o que ainda hoje está em vigor até para os planetas descobertos posteriormente. Surgiu então a sua segunda lei (deduzida antes da primeira):

“O vector posição do planeta (com origem no Sol e extremidade no planeta) varre áreas iguais em tempos iguais.”

As ideias de Kepler demoraram algum tempo a ser aceites pela sociedade, tal como a teoria Heliocêntrica pois tinham a grande oposição da Igreja Católica, que não era nada fácil de enfrentar e que na época “comandava” o mundo.

Kepler prosseguiu os estudos com enormes problemas ético-religiosos, pois todas as suas descobertas iam contra a sua religião, tentando encontrar relações de harmonia entre alguns elementos dos planetas. Revelando-se todos estes estudos um

fracasso, decidiu calcular as variações de velocidade angular, que também não o levaram a lado nenhum. Foi a partir destes cálculos que comparou as velocidades angulares extremas de pares de diferentes planetas e que chegou, em 1618, à sua terceira lei do movimento dos planetas:

“O quadrado do tempo de revolução do planeta em torno do Sol é directamente proporcional ao cubo do comprimento do semi-eixo maior da sua órbita.”

Johannes Kepler, um dos grandes impulsionadores do desenvolvimento da Astronomia e sobretudo da aceitação da Teoria Heliocêntrica de Copérnico, que ainda hoje está em vigor, faleceu a 15 de Novembro de 1630, em Regensburg, na Alemanha. Na manhã do seu enterro assistiu-se a um magnífico espectáculo celeste: um eclipse lunar.

Anexo F

Ficha de trabalho criada pelo professor de Filosofia, partindo do resumo por nós fornecido e dos objectivos traçados no anexo D.

Ficha de Trabalho de Filosofia

Conteúdo Programático: O Conhecimento e a racionalidade científica e tecnológica.

“Kepler: Observar, registar e discutir os céus”

A Astronomia, na primeira metade do século XVII, está no centro de uma revolução científica que destrói os princípios fundamentais da cosmovisão aristotélico-ptolomaica.

Kepler (1571-1630), apoiando-se nas observações exaustivas dos céus feitas pelo astrónomo Tycho Brahe, tenta provar a veracidade da teoria heliocêntrica defendida por Nicolau Copérnico. Apesar de ter contra si a oposição “fervorosa e perigosa” da igreja católica, consolida a ruptura com o paradigma geocêntrico dominante.

Depois de algumas tentativas falhadas de resolução do enigma de como relacionar a distribuição espacial das órbitas com os movimentos dos elementos do sistema solar, junta-se a Tycho Brahe em Praga. Os dados com que aí pode trabalhar levam-no à publicação da obra “*Astronomia Nova*”, onde surgem explicitadas as primeiras leis do movimento celeste. Perante a impossibilidade de explicar através do movimento circular a órbita de Marte, decide abandonar o modelo ptolomaico e, pelo método geométrico, conclui que a órbita de Marte seria uma elipse em que o Sol ocuparia um dos focos. E se a órbita de Marte seria uma elipse, também as órbitas dos outros planetas o seriam. Assim surge a primeira lei do movimento planetário: “a órbita de um planeta é uma elipse estando o Sol situado num dos focos”, que constitui uma verdadeira revolução filosófica na história do Ocidente, pois esta descoberta faz cair a ideia de circularidade como movimento natural perfeito.

Embora já tendo descoberto a elipse, Kepler nunca se separa da ideia de que Deus terá criado o mundo à sua imagem e que essa só poderá ser esférica, símbolo

geométrico da Trindade. Tenta gerir a ideia de um Universo de órbitas elípticas e movimentos não uniformes com todas as harmonias divinas, nas quais não queria deixar de acreditar. No seu livro “*Harmonice Mundi*”, relaciona os seus devaneios místicos com as suas descobertas, mas ainda assim o que surge explicitamente manifesto é a imagem moderna do mundo, um maravilhoso mecanismo de relojoaria, regido por leis imutáveis e extrínsecas aos corpos.

PROPOSTA DE TRABALHO

A partir da leitura e análise do texto, elabore uma composição filosófica que problematize o tema da dialéctica da ruptura e da continuidade em ciência.

Anexo G

Proposta de uma aula criada pelo professor de História, partindo do resumo por nós fornecido e dos objectivos traçados no anexo D.

Aula de História

Conteúdo Programático: A revolução das concepções cosmológicas.

“Kepler, um dos fundadores do heliocentrismo”

Começaremos por caracterizar o período no qual se inserem as investigações de Kepler e dos seus pares Tycho Brahe e Galileu Galilei.

Este período corresponde já à fase subsequente ao Renascimento, período histórico que proporcionou em simultâneo o desenvolvimento do espírito crítico e a abertura de novos caminhos para o conhecimento do Homem e do Universo que o rodeava. É neste contexto que vai eclodir a revolta de Lutero, como sintoma de um mal-estar crónico na Igreja Católica, potenciado pelos apelos dos humanistas à Igreja primitiva, de alcance e consequências políticas, sociais e culturais duradouras. Tentar-se-á que os alunos apreendam a efervescência cultural que se vivia neste período.

Paralelamente iremos relembrar aos alunos a concepção teocêntrica do Mundo e a sua associação à concepção cosmológica do geocentrismo, a primeira decorrente da Idade Média e do monopólio quase total exercido pela Igreja sobre a cultura e o segundo de raízes gregas (aristotélicas), mas adoptado pela mesma Igreja.

Lentamente, mas de forma consistente, a imagem de Deus e da Sua relação com o Mundo começam a mudar por força do Renascimento. Deus é agora o criador do Homem que por ser feito à Sua imagem e semelhança é colocado no centro do Mundo e desafiado a descobrir as regras de funcionamento desse mesmo Mundo.

O contributo de Copérnico é fundamental porque abriu caminho a toda uma série de investigações que impôs, contra a vontade da Igreja a teoria heliocêntrica, das quais destacaremos as de Kepler.

Neste ponto faremos uma incursão pelas origens familiares de Kepler, destacando as suas origens remediadas e o seu percurso escolar, nomeadamente a sua passagem pela Universidade de Tuebingen e o seu contacto com Michel Maestelin,

astrónomo, ptolomaico de formação, mas heliocêntrico por acção pedagógica, de onde nasceu a sua vocação para a astronomia. Nesta altura, de finais do século XVI, o jovem Kepler observava os céus e começava a criar as bases de toda a sua teoria, quando estabeleceu paralelos entre os seis planetas conhecidos e os sólidos platónicos perfeitos.

Fazendo uso de um salutar hábito desenvolvido pelos humanistas, Kepler corresponde-se epistolarmente com outros sábios de ideias e posturas semelhantes (questionamento do conhecido e da autoridade dos Antigos), nomeadamente com Galileu Galilei e Tycho Brahe e o seu mestre Michel Maestlin, a quem envia exemplares da sua primeira obra publicada em 1596 sob o título de “*Mysterium Cosmographicum*”, na qual recupera a teoria copernicana, que defende sendo visível a sua dificuldade em conciliar a sua apetência pelo heliocentrismo e o seu respeito pela religião. O sábio italiano respondeu a Kepler afirmando-se também heliocentrista, enquanto Brahe o aconselhava a solidificar os conhecimentos através de observações sistemáticas.

O Antigo Regime, conhecido período da História moderna caracterizava-se, do ponto de vista demográfico, pela ocorrência de epidemias e pestes, que atingiram de forma dura a família de Kepler. Por outro lado, a resposta da Igreja Católica à Reforma Protestante provoca as guerras religiosas e perseguições a protestantes. Figura grada e conhecida de reis e imperadores, O sábio encontra refúgio em Praga onde se encontra com Brahe, então com 53 anos de idade. As diversas catas trocadas estreitaram os laços e permitiram a ambos compreenderem as vantagens de trabalharem em conjunto. O trabalho conjunto, intercalado com algumas dissensões, termina apenas com a morte de Tycho que designa Kepler seu sucessor. Promovendo a publicação da obra do amigo, Kepler amplia os conhecimentos do mestre, publica obras diversas ao mesmo tempo que cria duas novas áreas do conhecimento: a Óptica Instrumental e a Astronomia Física, de grande alcance futuro. É de realçar o seu estudo sobre Marte publicado em 1609 onde recupera e acrescenta aos seus, conhecimentos de Ptolomeu, Copérnico e Brahe. Por outro lado, Kepler disserta sobre o Sol e a sua importância enquanto fonte de Luz e atractor de outros planetas.

Um ano depois recebe a segunda e última carta de Galileu que lhe agradece a aceitação das suas teorias e lamenta a ignorância de alguns dos seus pares. Em 1661 a sua família é novamente atingida pela doença que lhe levou a esposa e um dos filhos. Sensivelmente na mesma altura, a mãe foi acusada de bruxaria (uma acusação gravíssima e merecedora de pena capital) da qual se livrou graças ao prestígio do filho.

Contraí novamente casamento e o seu afã científico não sofre abrandamento. Pelo contrário a sua curiosidade diversifica-se e dedica-se agora à Cronologia e à matemática Aplicada, publicando sempre.

Destaquemos agora as leis descobertas por Kepler e o seu impacto na ciência astronómica.

A primeira lei – *A órbita de um planeta é uma elipse estando o Sol situado num dos focos.* Esta lei surgiu depois de apurados estudos sobre Marte e a Terra e discussões científicas com Galileu que recusa a forma elíptica como irracional e contrária ao belo herdado do Renascimento.

A segunda lei – *O vector posição do planeta (com origem no Sol e extremidade no planeta) varre áreas iguais em tempos iguais.* Esta segunda lei, clarifica a teoria de Copérnico e inova-a, nomeadamente ao posicionar o Sol no centro do sistema, ao referir que os planetas descrevem as suas órbitas no mesmo plano e sem oscilar e a ausência de uniformidade do movimento dos planetas.

A terceira lei – *O quadrado do tempo de revolução de um planeta em torno do Sol é directamente proporcional ao cubo do comprimento do semi-eixo da sua órbita.*

Mais importante do que estudar as leis de Kepler (que não cabem no âmbito desta lição) é importante destacar a título de conclusões:

✓ Kepler foi um homem do seu tempo e portanto a sua postura de questionador do saber existente e formulador de teorias e conceitos coabitava com a sua mente religiosa, tornando difícil a conciliação do heliocentrismo decorrente de investigações com a mentalidade geocêntrica que transpirava da interpretação bíblica aceite;

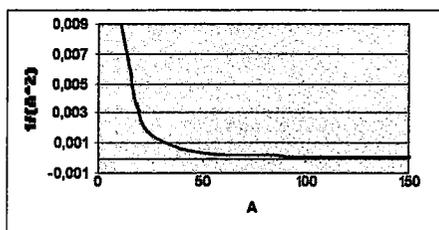
✓ Kepler ampliou os conhecimentos de Copérnico, sendo justo considerá-lo um dos fundadores do heliocentrismo;

✓ As ideias de Kepler, Copérnico, Brahe e Galileu entroncam no conhecimento científico da Natureza, que nasceu no ambiente de abertura cultural decorrente do Renascimento e cuja base fundamental é a matematização do real;

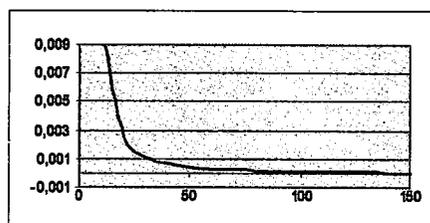
✓ O conhecimento científico é cumulativo e acrescenta sempre algo de novo ao existente.

Anexo H

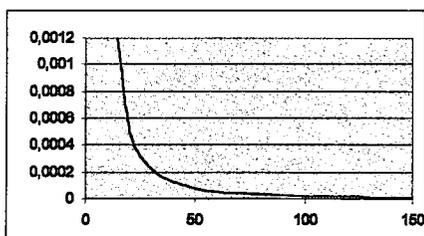
“Gráficos para a obtenção do declive”



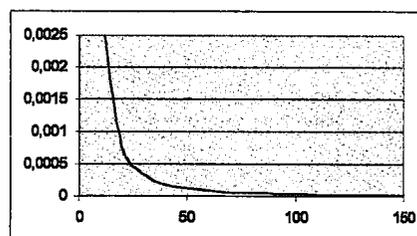
1



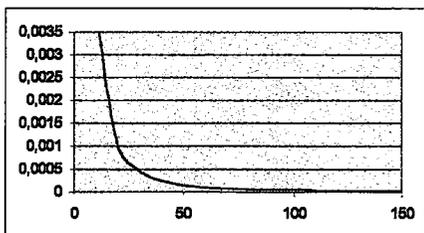
2



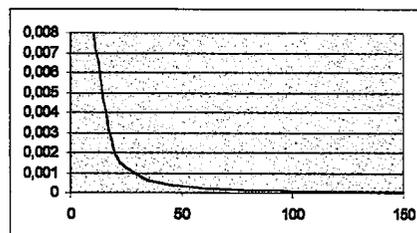
3



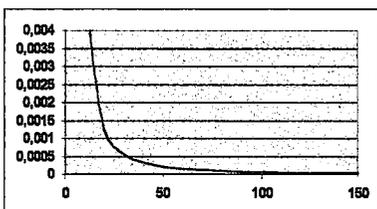
4



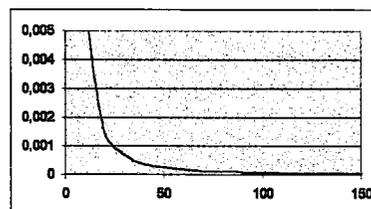
5



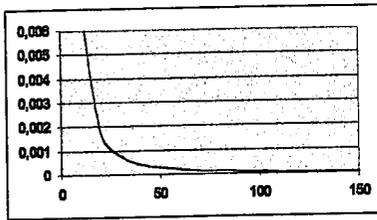
6



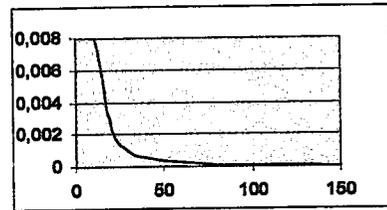
7



8



9



10