

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO, FILOSOFIA E HISTÓRIA
DAS CIÊNCIAS

TESE DE DOUTORADO

**ARGUMENTAÇÃO E ABORDAGEM CONTEXTUAL
NO ENSINO DE FÍSICA**

Autor:
MSc. Elder Sales Teixeira

Orientador:
Dr. Olival Freire Jr.

Co-orientadora:
Dra. Ileana Maria Greca

Salvador – Novembro de 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO, FILOSOFIA E HISTÓRIA
DAS CIÊNCIAS

TESE DE DOUTORADO

**ARGUMENTAÇÃO E ABORDAGEM CONTEXTUAL
NO ENSINO DE FÍSICA**

Autor:

MSc. Elder Sales Teixeira

Orientador:

Dr. Olival Freire Jr.

Co-orientadora:

Dra. Ileana Maria Greca

Trabalho de tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências (UFBA/UEFS), para defesa e avaliação, como requisito para obtenção do grau de doutoramento neste Programa.

Salvador – Novembro de 2010

Agradecimentos

Conforme argumentou o linguista e filósofo Mikhail Mikhailovich Bakhtin, todo discurso é polifônico, uma vez que é influenciado por outros discursos, oriundos de diversas fontes. É neste sentido que apresento esta tese – como um discurso polifônico – e, ora, venho agradecer a algumas das principais fontes que, de forma direta ou indireta, se tornaram parte importante deste trabalho:

- À minha família, especialmente minha esposa Cléa e meus filhos Lua, Ariel e Brisa, que são presenças indissociáveis da minha vida e fontes de motivação e inspiração em tudo o que faço;
- Aos meus amigos, que representam uma extensão da minha família e estão sempre presentes;
- Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, com os quais, a interação me rendeu valiosos frutos cognitivos e principalmente afetivos;
- Aos alunos das turmas de 2007 e 2008 da disciplina “Física Básica I” da Licenciatura Noturna em Física da UFBA, pela participação voluntária como sujeitos da pesquisa na sua parte empírica;
- A Climério, pela significativa contribuição no trabalho de campo e na análise dos dados;
- Aos professores Luiz Peduzzi e Sônia Peduzzi, pela maneira acolhedora com que me receberam em Florianópolis, além da contribuição direta do professor Peduzzi no trabalho;
- Aos membros da banca de qualificação Maria Cristina Penido, Maria da Conceição Oki e Luiz Peduzzi, pelas valiosas críticas e sugestões;
- A Ileana, pela inestimável contribuição neste trabalho como um todo e, em especial, pelos ensinamentos quanto aos aspectos metodológicos que fazem parte de uma pesquisa. Seus estímulos ajudaram a me tornar mais exigente comigo mesmo;
- A Olival, não somente pela orientação nesta tese, como também pela orientação e ensinamentos ao longo de toda a minha formação profissional. Declaro a minha admiração pelo seu estilo de orientar estando sempre presente e, ao mesmo tempo, prezando pela autonomia do orientando. Acho que batemos um recorde por ficar mais de quinze anos trabalhando numa relação de orientador/orientando sem brigar.

Sumário

Resumo.....	1
Abstract.....	2
Capítulo 1 – Introdução.....	3
Capítulo 2 – Síntese da Pesquisa sobre Abordagem Contextual no Ensino de Física.....	13
Capítulo 3 – Uma Revisão Histórica sobre a Gravitação Universal de Newton.....	40
Capítulo 4 – Análise de uma Intervenção Didática com Uso de Abordagem Contextual com Enfoque na Argumentação.....	81
Capítulo 5 – Uma Proposta Didática para Ensinar Gravitação Universal de Newton, Orientado por História e Filosofia da Ciência, com Enfoque na Argumentação.....	117
Capítulo 6 – Conclusão e Considerações Finais.....	137
Anexo – Produtos da Tese.....	143

Resumo

Este trabalho visa investigar a qualidade da argumentação produzida coletivamente sobre a síntese newtoniana em sala de aula de uma disciplina orientada por uma abordagem contextual de ensino, e o papel desta abordagem na argumentação produzida. Visa também apresentar uma proposta didática para ensinar a gravitação universal de Newton, de forma orientada pela história e filosofia da ciência, com um enfoque em promover habilidade de argumentação aos alunos sobre o referido assunto. Para desenvolver este trabalho foi feita uma revisão das pesquisas que investigam aplicações didáticas de ensino de física orientadas pela história e filosofia da ciência; elaborado um material instrucional sobre a gravitação universal de Newton de forma integrada com o processo de desenvolvimento histórico da mesma; analisada a implementação em sala de aula da disciplina 'Física Básica I' da Licenciatura Noturna em Física da UFBA, de uma estratégia de ensino focada na construção coletiva de uma argumentação sobre a síntese newtoniana; desenvolvido um material instrucional para apresentar o *layout* de argumentação de Toulmin de forma contextualizada, como um instrumento de elaboração e análise de um argumento; e apresentada uma proposta didática com enfoque em promover maior habilidade de argumentação aos alunos sobre a gravitação universal de Newton a partir de uma abordagem contextual de ensino. O trabalho foi realizado na forma de múltiplos artigos, sendo que cada capítulo foi desenvolvido como um estudo independente mas, ao mesmo tempo, o conjunto dos capítulos foram se complementando para constituir a unidade do trabalho como um todo.

Abstract

This work intends to investigate the quality of the argumentation collectively elaborated on the Newtonian synthesis in a classroom of a course guided by a contextual approach and the role of this approach in the produced argumentation. It also aims to suggest a didactic proposal to teach Newton's universal gravity based on history and philosophy of science and intended to enhance student's argumentation skills about this subject. In order to work out this research, it was 1) done a review of the researches which investigated didactic applications of physics teaching based on history and philosophy of science; 2) elaborated instructional materials on Newton's universal gravity integrated with the historical development of this subject; 3) analysed the experience of a classroom of the course "Física Básica I" of the night course for physics teachers at the UFBa, which was focused on the collective production an argumentation about the Newtonian synthesis; 4) produced an instructional material to introduce Toulmin's argumentation layout in a contextual manner as an instrument to elaborate and analyse argumentation; and finally 5) suggested a didactic proposal based on a contextual approach and driven towards improving student's argumentation skills about Newton's universal gravity. The research's results were organized as multiple papers, each chapter of this dissertation being developed as an independent study while the ensemble of the chapters complement each other to express the unity of the research as a whole.

Capítulo 1

Introdução

Introdução

Venho abrir, neste primeiro capítulo, o presente trabalho visando mostrar um pouco do contexto que deu origem ao mesmo e o quão ele está relacionado com a minha própria trajetória profissional. Ainda, no capítulo, faço uma apresentação do problema de pesquisa do qual trata este trabalho; descrevo como ele foi desenvolvido ao longo do meu doutoramento; e apresento as razões pelas quais escolhi escrever a tese na forma de múltiplos artigos. Por razões óbvias, faço uma descrição pessoal e é o único momento da tese em que escrevo em primeira pessoa.

Concluí o Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal da Bahia (UFBA) em 1996. Logo após ter colado grau fui contratado como professor substituto, pela Faculdade de Educação da UFBA onde fiquei por um ano. Ainda neste ano, ingressei também como professor substituto na Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Em abril de 1997 aconteceram duas coisas importantes que foram determinantes para o posterior desenvolvimento deste trabalho: fui aprovado no concurso para professor da matéria ‘Ensino de Física’ na UEFS; a implantação do Curso de Licenciatura em Física da UEFS.

O currículo do Curso de Física da UEFS trazia algumas diferenças em relação aos currículos convencionais de física. Uma delas era a existência de três disciplinas chamadas ‘Fundamentos de Física I, II e III’, cujas ementas se referiam a discussões dos assuntos de maneira eminentemente conceitual. Vi, neste ponto, a possibilidade de inserir no curso algo do qual, desde quando era estudante, sentia falta no currículo do Curso de Física da UFBA: uma abordagem de ensino que levasse em conta a contextualização histórica e filosófica ao tratar dos conceitos da física – que passei a chamar, usando a terminologia de Michael Matthews, de abordagem contextual de ensino de física.

Convenci os meus colegas da Área de Física da UEFS – hoje, Departamento de Física – sobre a importância da inclusão de elementos de história e filosofia da ciência na formação dos estudantes de licenciatura e que aquelas disciplinas eram propícias para isto. Assim, fui indicado para elaborar o programa e ministrar a disciplina ‘Fundamentos de Física I’ – e, posteriormente as outras duas – que era a primeira disciplina de física da grade curricular do curso na época.

Seguramente, a abertura para a inclusão de elementos de história e filosofia da ciência em três disciplinas do curso de forma a permear sua grade curricular só foi possível devido fundamentalmente a dois fatores: primeiro, a sensibilidade de uma boa parte dos meus colegas, que naquele momento constituíam a Área de Física, em relação aos meus clamores sobre a relevância de tais elementos para uma formação mais crítica dos estudantes de licenciatura; segundo, a minha formação que, embora ainda inicial, já demonstrava uma explícita vocação para a área de pesquisa em ensino de física orientado pela história e filosofia da ciência.

De fato, desde o início da graduação percebi minha inclinação pelo ensino de física, daí a opção pela licenciatura, ao tempo em que percebi também uma deficiência no Curso de Física da UFBA em relação aos fundamentos históricos e epistemológicos da física, o que me levou a um envolvimento, durante a graduação, com atividades de pesquisa e extensão ligadas às questões de ensino, história e filosofia da ciência. Dentre estas atividades, destaco dois trabalhos de iniciação científica desenvolvidos sob a orientação do professor Olival Freire Jr. com quem, desde aquele momento, estabeleci uma relação fraterna e profissionalmente frutífera. Estes trabalhos foram apresentados no XI Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF), em 1995, e no XIV Encontro de Físicos do Norte e Nordeste (EFNNE), em 1996, sendo que este último foi publicado no Caderno Brasileiro de Ensino de Física (Teixeira e Freire, 1999)¹.

Essa trajetória me deu algum subsídio, um pouco de confiança e muita ousadia para tentar implementar, em três disciplinas de um curso de física recém iniciado, um tipo de abordagem de ensino que era objeto de muita discussão e estudo entre os pesquisadores. Com o intuito de colaborar com essa discussão e de averiguar a eficácia deste tipo de abordagem na formação dos estudantes, em um caso particular, desenvolvi o problema de pesquisa que se transformou no meu trabalho de Mestrado iniciado em 2000 no recém criado Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências (PPGEFHC), sob orientação de Olival Freire Jr. e co-orientação de Charbel Niño El-Hani, ambos professores da UFBA. O trabalho, que foi concluído em 2003, investigou a influência de uma abordagem contextual de ensino de física nas visões sobre a natureza da ciência de estudantes de física da UEFS².

Portanto, a minha participação na elaboração das disciplinas 'Fundamentos de Física I, II e III' do Curso de Física da UEFS está intimamente relacionada com o nascedouro da minha pesquisa de mestrado. Contudo, o trabalho do mestrado deixou algumas lacunas que representavam possibilidades para futuras pesquisas, dentre elas a necessidade de investigar a eficácia de uma abordagem contextual em relação a possíveis benefícios quanto à compreensão conceitual dos alunos sobre os assuntos da física. Assim, começaram a surgir as primeiras preocupações que, aos poucos, foram se transformando no problema de pesquisa que veio a ser desenvolvido neste trabalho de doutorado.

Ingressei como aluno da primeira turma de doutorado no PPGEFHC em 2006 com meu objeto de estudo voltado para investigar as influências e contribuições da história e filosofia da ciência na formação dos estudantes de física, no que diz respeito à compreensão destes acerca dos conceitos da física. Contudo, de início, este objeto ainda estava muito geral e, no ano seguinte, passou a ficar mais definido em função de duas coisas: a decisão de acompanhar, como observador participativo, a disciplina 'Física Básica I' do Curso de Licenciatura Noturna em Física da UFBA, ministrada pelo professor

¹ Teixeira, E. S. e Freire, O. (1999). A Ciência Galileana: uma Ilustre Desconhecida. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 16(1), 35-42.

² Teixeira, E. S. (2003). *A Influência de uma Abordagem Contextual nas Concepções sobre a Natureza da Ciência: Um Estudo de Caso com Estudantes de Física da UEFS*. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências) – UFBA/UEFS. Salvador.

Olival Freire, disciplina esta que usa uma abordagem contextual para tratar dos conceitos da física (da antiguidade à síntese newtoniana), e que viria a ser o campo de trabalho da parte empírica da minha pesquisa; o primeiro contato com o modelo de argumentação de Toulmin, através da leitura de um artigo, que me deixou muito estimulado com a possibilidade de avaliar objetivamente um aspecto da compreensão conceitual dos alunos. Diante da dificuldade de analisar objetivamente algo de natureza interna, subjetiva, fiquei bastante empolgado com a possibilidade de analisar de forma objetiva a qualidade da argumentação dos alunos, que é algo externalizado, através de um modelo de argumentação prático, como o de Toulmin, o que me levou a definir o problema de pesquisa.

Logo abaixo, faço uma apresentação do problema e dos subproblemas de pesquisa dos quais trata a tese, na forma de objetivos gerais e específicos, respectivamente.

Objetivos gerais:

- (i) avaliar a qualidade da argumentação produzida coletivamente sobre a síntese newtoniana em sala de aula de uma disciplina orientada por uma abordagem contextual de ensino, e o papel da história e filosofia da ciência nesta abordagem de ensino;
- (ii) apresentar uma proposta didática voltada para o ensino da gravitação universal de Newton, orientado pela história e filosofia da ciência, com um enfoque em promover habilidade de argumentação aos alunos sobre a gravitação universal de Newton.

Objetivos específicos:

- (i) fazer um levantamento dos resultados das pesquisas que investigam o uso de abordagens de ensino de física orientadas pela história e filosofia da ciência;
- (ii) fazer uma revisão da história da gravitação universal de Newton com vistas a ser usado como material instrucional da proposta didática acima referida;
- (iii) analisar a implementação de uma estratégia de ensino focada na construção coletiva de uma argumentação sobre a síntese newtoniana, em sala de aula da disciplina 'Física Básica I' da Licenciatura Noturna em Física da UFBA;
- (iv) desenvolver um material instrucional para apresentar o *layout* de argumentação de Toulmin, como um instrumento de elaboração e análise de um argumento, com vistas a ser usado na proposta didática acima referida;
- (v) apresentar uma proposta didática com enfoque em promover maior habilidade de argumentação aos alunos sobre a gravitação universal de Newton a partir de uma abordagem contextual de ensino.

Assim, como se trata de um trabalho com pretensão tanto de avaliar – em uma situação específica de sala de aula – quanto de propor uma estratégia de ensino de física envolvendo o uso didático de história e filosofia da ciência, compreendemos como necessário que o mesmo começasse com uma revisão da literatura especializada sobre esta temática. Entretanto, em vez de fazer uma revisão nos moldes convencionais – do tipo revisão narrativa – decidimos fazer uma revisão sistemática das pesquisas que investigam intervenções

didáticas com uso de história e filosofia da ciência no ensino de física. Este tipo de revisão tem inúmeras vantagens em relação ao tipo convencional. Algumas destas vantagens estão sintetizadas no quadro abaixo que foi traduzido de Dios e Santamaría (2007)³.

Características diferenciais dos distintos tipos de revisão		
	Revisão narrativa	Revisão sistemática
Pergunta	Ampla e pouco definida	Clara e concreta sobre uma questão definida
Busca das fontes	Não especificada, alta probabilidade de vieses	Estratégia especificada, sistemática e explícita
Seleção dos estudos	Não especificada, alta probabilidade de vieses	Critérios especificados e aplicados de maneira uniforme
Qualidades dos estudos	Variável, porém geralmente não avaliada	Crítica e rigorosa (segundo critérios explícitos)
Síntese de dados	Frequentemente qualitativa, subjetiva e sem um estimador estatístico	Quantitativa, se possível através de um estimador estatístico
Inferência	Variável, em ocasiões baseada na evidência, porém mais frequentemente baseada em opiniões pessoais	Baseada em evidências e com a identificação das lacunas de conhecimento que persistem

De fato, fazer uma revisão nestes moldes me permitiu obter informações importantes sobre esta área de conhecimento de uma forma sistemática possibilitando fazer uma síntese do seu ‘estado da arte’ de maneira confiável e, adicionalmente, permitindo identificar algumas dificuldades da área e projetar futuros caminhos para a pesquisa. Isto foi de grande valor para a elaboração da proposta didática, pois um dos resultados encontrados nesta revisão foram os efeitos positivos do uso didático da história e filosofia da ciência na qualidade da argumentação, bem como a necessidade de maiores esforços de pesquisa com este enfoque; outro resultado diz respeito aos efeitos positivos do uso didático da história e filosofia da ciência também em relação a propiciar visões mais amadurecidas dos alunos em relação à natureza da ciência. Estes resultados influenciaram na elaboração da proposta didática que conta com elementos de ambos os aspectos em seu escopo. Esta revisão sistemática foi apresentada no *International Congress of Science Education* em 2009 na cidade de Cartagena, Colômbia, e está publicada em versão *online* no periódico *Science and Education* (ver Teixeira et al., 2009)⁴ e constitui o segundo capítulo da tese. Considero este trabalho de revisão sistemática de grande importância, pois além da dificuldade e o desafio que representou fazê-lo, ele me permitiu compreender melhor esta área de conhecimento na qual venho trabalhando desde a graduação e oferece uma grande contribuição tanto para os professores que pretendam fazer uso de história e filosofia da ciência no ensino de física, quanto para os pesquisadores que atuam nesta área.

Após o primeiro semestre de 2007, quando a disciplina ‘Física Básica I’ foi ministrada, já havíamos definido, portanto, que o trabalho iria tratar de

³ Dios, J. G. e Santamaría, A. B. (2007). Revisión Sistemática e Metanálisis (I): Conceptos Básicos. *Evidencias en Pediatría*, 3(4), 107.

⁴ Teixeira, E. S.; Greca, I.; Freire, O. (2009). The History and Philosophy of Science in Physics Teaching: A Research Synthesis of Didactic Interventions. *Science and Education*. DOI 10.1007/s11191-009-9217-3.

investigar a qualidade da argumentação construída coletivamente pelos alunos, através de atividades em grupos, da referida disciplina sobre a gravitação universal de Newton – que constitui o ápice da disciplina quando é discutido o significado da síntese newtoniana – e, como fruto dos resultados da análise que fiz em um primeiro estudo exploratório – que descreverei mais adiante – o trabalho deveria também propor uma estratégia didática mais aprimorada para tratar deste tema através de uma abordagem contextual, com vistas a melhorar a habilidade de argumentação dos alunos sobre a gravitação universal de Newton.

Para isto, seria necessário utilizar um material instrucional que tratasse da gravitação universal de Newton dentro de uma perspectiva contextual, ou seja, integrada a uma discussão de natureza histórico-filosófica. Entretanto, a forma como este tema tem sido apresentado nos livros didáticos me deixou bastante insatisfeito, pois percebi que trazem uma série de erros históricos, como atribuir a Newton a dedução da lei de força $F=GMm/R^2$, coisa que ele não fez; além de dificuldades conceituais, a exemplo do uso inapropriado do argumento da terceira lei de Newton na dedução desta lei de força; e, ainda, suscitam equívocos quanto à imagem da ciência e do trabalho do cientista, a exemplo da idéia de que Newton elaborou a gravitação universal a partir do ‘*insight*’ da queda de uma maçã, sem discutir apropriadamente o processo histórico.

Este descontentamento me fez decidir por elaborar um texto que pudesse dar conta dessas e de outras dificuldades e, assim, apresentar a gravitação universal de Newton de forma integrada com seu desenvolvimento histórico-conceitual de uma maneira mais apropriada. Em função disso, eu e meu orientador tomamos a decisão de fazer o estágio ‘sanduíche’ do meu doutorado⁵ com alguém que tivesse *expertise* na elaboração de materiais didáticos de física informados por história e filosofia da ciência. Isto me levou a Florianópolis para trabalhar com o professor Luiz Peduzzi da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e lá desenvolver o referido texto.

A idéia inicial deste texto era fazer uma reconstrução histórica sobre os passos científicos de Newton na elaboração da gravitação universal, contudo, como fruto da nossa imersão nos estudos do *Principia* de Newton, bem como dos especialistas em estudos newtonianos, percebemos, eu o professor Peduzzi, que havia uma controvérsia historiográfica entre dois dos principais especialistas no assunto, a saber, I. Bernard Cohen e Richard S. Westfall. Isto conduziu o trabalho para a elaboração de um texto que procurasse reproduzir este debate historiográfico estabelecendo um contraste entre as duas reconstruções históricas e, em seguida, discutir as implicações para o ensino da gravitação universal. Esta idéia me pareceu bastante interessante, pois trazer uma controvérsia para discussão em sala de aula através de atividades em grupos pode ser bem mais enriquecedor para uma compreensão mais fiel do processo de construção do conhecimento científico, em função de explicitar sua real complexidade, do que apresentar uma única reconstrução histórica e correr o risco de incorrer em *whiggismo* – uma reconstrução excessivamente

⁵ Este estágio somente foi possível devido ao apoio financeiro do PROCAD/NF, um programa de cooperação acadêmica da CAPES, a quem sou bastante grato por isso.

simplificada da história da ciência que apresenta apenas a versão do conhecimento científico considerado como válido pela contemporaneidade.

Assim, foi desenvolvido o texto que depois foi transformado no artigo recentemente publicado no Caderno Brasileiro de Ensino de Física (Teixeira et al., 2010)⁶ que constitui o terceiro capítulo da tese e que incluímos como um dos materiais instrucionais para compor a proposta didática referida no segundo objetivo geral da tese. Este trabalho foi apresentado na 1ª Conferência Latinoamericana do International History, Philosophy, and Science Teaching Group (1ª IHPST-LA) em 2010, no município de São Sebastião, São Paulo e me deixou muito satisfeito tê-lo conseguido fazer, pois também foi um desafio enfrentar os *Principia* de Newton, um livro cuja leitura é muito difícil, bem como enfrentar outros textos de historiadores profissionais e, mais ainda, produzir uma narrativa de natureza histórica, sobretudo levando-se em conta que não sou historiador profissional.

Durante o acompanhamento da disciplina 'Física Básica I' no primeiro semestre de 2007, pude fazer algumas intervenções em sala de aula e, como se tratava de nossas primeiras investidas no tema da argumentação em sala de aula, decidimos fazer um estudo exploratório para coletar as primeiras impressões e indicação de possíveis problemas, além de sugestões para, no semestre seguinte em que a disciplina viria a ser oferecida (em 2008), aprimorar tanto a intervenção quanto os aspectos metodológicos da pesquisa a fim de coletar os dados definitivos que deveriam constituir a parte empírica do trabalho. Assim, ainda em 2007 realizamos um conjunto de atividades em grupos com os alunos, que foram registradas em vídeo, transcritas e analisadas, usando como instrumento de análise a estrutura de argumentação de Toulmin. Para nosso contentamento, os dados ficaram tão bons que decidimos apresentar no Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências (ENPEC) em Florianópolis no ano de 2007 e, posteriormente transformar em um artigo que recentemente foi publicado na revista Investigações em Ensino de Ciências⁷.

Conforme planejado, fizemos com a turma de 2008 uma nova série de atividades já com os devidos ajustes tanto na intervenção didática quanto na metodologia da pesquisa – em função dos resultados obtidos com a análise dos dados anteriores – com a intenção de desenvolver um estudo mais completo que o anterior para compor, juntamente com o primeiro, o estudo empírico da tese. Em função de passar o restante daquele ano em Florianópolis, havíamos planejado analisar estes novos dados no segundo semestre de 2009. Entretanto, como resultado do exame de qualificação, que aconteceu em meados de 2009, ficou decidido pela banca que o artigo supracitado já era suficiente para constituir o capítulo referente à parte empírica do trabalho e que não seria necessário incluir a outra análise empírica na tese (esta análise poderia ser deixada para depois da tese), sobretudo, em função

⁶ Teixeira, E. S.; Peduzzi, L. O. Q.; Freire, O. (2010). Os Caminhos de Newton para a Gravitação Universal: Uma Revisão do Debate Historiográfico entre Cohen e Westfall. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27(2), 215-254.

⁷ Teixeira, E. S.; Silva, C. P.; Freire, O.; Greca, I. (2010). A Construção de uma Argumentação sobre a Síntese Newtoniana a partir de Atividades em Grupos. *Investigações em Ensino de Ciências*, 15(1), 61-95.

do tempo disponível para conclusão do doutorado. Desta forma, o artigo resultou por constituir o quarto capítulo desta tese. Devo salientar que este artigo traz algumas limitações por ter sido oriundo de um estudo exploratório sem a intenção inicial de se constituir como o estudo empírico definitivo da tese. Logo abaixo, apresento algumas distinções entre os estudos de 2007 e 2008 para explicitar estas limitações. Apesar de tais limitações, o estudo relatou resultados favoráveis quanto ao papel da abordagem contextual na qualidade de argumentação, o que nos deu suporte empírico para a elaboração da proposta didática que visa o cumprimento do segundo objetivo geral da tese.

Estudo de 2007	Estudo de 2008
Não foi feito o levantamento das concepções prévias nem em relação ao assunto, nem em relação aos conhecimentos sobre história e filosofia da ciência	Foi feito o levantamento das concepções prévias sobre a gravitação universal de Newton e também sobre história e filosofia da ciência através de dois questionários
Foram usados como instrumentos de coleta de dados: vídeo- e áudio-gravação das atividades e notas de campo	Foram usados como instrumentos de coleta de dados: vídeo- e áudio-gravação das atividades, questionários, notas de campo e prova escrita (que faz parte da avaliação ordinária da disciplina)
Foi usado um questionário para orientar a discussão em grupos	Não foi usado qualquer questionário para orientar a discussão em grupos
A mediação da discussão entre os grupos foi feita de forma espontânea pelo professor, embora, conforme a análise mostrou, foi detectado um padrão nas formas de interação	A mediação da discussão entre os grupos foi feita pelo professor de forma orientada por um protocolo pré-estabelecido

Após, então, fazer uma síntese das pesquisas sobre o uso de abordagem contextual no ensino de física; de elaborar um material didático sobre a gravitação universal de Newton com este tipo de abordagem; e de investigar, em uma situação específica de sala de aula, uma aplicação deste tipo de abordagem visando avaliar a qualidade da argumentação dos alunos sobre o referido assunto, já tinha subsídios o bastante para me debruçar sobre a elaboração de uma proposta didática que viesse a satisfazer as minhas inquietações quanto à forma como a gravitação universal de Newton deve ser ensinada em sala de aula de disciplinas tais como ‘Física Básica I’, com vistas a promover melhor qualidade de argumentação nos alunos.

Entretanto, ao me deparar com a literatura que trata de argumentação no ensino de ciências, em particular, a que usa o *layout* de argumentação de Toulmin, percebi uma quase ausência de discussão sobre os fundamentos que levaram Toulmin a propor seu modelo. Em geral, este modelo é usado de forma meramente instrumental nos artigos e pouca atenção é dada ao papel destes fundamentos na opção dos autores pelo *layout* de Toulmin como modelo adequado de argumentação para o ensino das ciências. Desta forma, no artigo referente ao capítulo cinco da tese, inclui uma seção que, visando superar esta minha insatisfação, discute e apresenta o *layout* de Toulmin de uma forma contextualizada para ser usada como material instrucional da proposta didática que constitui o capítulo cinco da tese.

A tese é finalizada com o capítulo seis, um capítulo de conclusão e considerações finais, no qual procuro sintetizar os principais resultados obtidos

com o trabalho ao enfrentar o problema e subproblemas de pesquisa, bem como busco indicar algumas perspectivas de trabalho que surgiram desta pesquisa para serem desenvolvidas em futuros estudos.

Finalizo este capítulo introdutório da tese justificando a minha escolha, em concordância com os orientadores e com a corroboração da banca de qualificação, pelo formato de múltiplos artigos, em que cada capítulo corresponde a, e é escrito na forma de um artigo. As razões para esta escolha são muitas e advêm das grandes vantagens que oferece, tais como:

(i) visibilidade do trabalho – uma tese, em geral, é lida por poucos e acaba sendo esquecida nas prateleiras das bibliotecas. Os artigos, por outro lado, uma vez que publicados em revistas conceituadas e de grande circulação na sua área de conhecimento, têm muito maior visibilidade e, com isto, acabam propiciando uma maior contribuição tanto para os professores que pretendam fazer uso dos artigos em suas atividades de sala de aula, quanto para os pesquisadores que queiram utilizar os mesmos em suas investigações;

(ii) produtividade – é mais produtivo concluir a tese já com um conjunto de artigos escritos do que escrever a tese no formato convencional (monográfico) para depois tentar extrair os artigos da mesma, o que, em geral, é mais difícil de fazer;

(iii) interação com os pares – o trabalho monográfico é mais solitário e, portanto, menos colaborativo. A produção de um artigo, por outro lado, envolve maior interação com os demais participantes do mesmo, além de maior interação com os pares, a exemplo dos árbitros das revistas que, ao criticar e julgar o trabalho, conduz o autor a uma maior reflexão e aprimoramento do próprio trabalho;

(iv) formação do pesquisador – o doutorado acadêmico tem, como função primordial, formar o doutorando para a pesquisa, ou seja, prepará-lo da maneira mais completa possível para a atividade prática de pesquisador, o que inclui aprender a trabalhar em cooperação, expor seu trabalho à crítica dos pares, saber assimilar bem as críticas quando pertinentes sem adotar uma postura defensiva, participar de grupo(s) de pesquisa, fazer intercâmbio com outros grupos de pesquisas, comunicar seus resultados de pesquisa através dos encontros acadêmicos e da publicação de artigos, dentre outras coisas. E, indubitavelmente, escrever a tese no formato de múltiplos artigos propicia uma melhor preparação na formação do futuro pesquisador nestes termos do que o formato monográfico no qual o doutorando trabalha muito mais ensimesmado;

(v) diversificação dos métodos de pesquisa – o formato de múltiplos artigos permite colocar o doutorando em contato com um maior espectro de técnicas e métodos de pesquisa, posto que cada artigo, a despeito de fazer parte de um mesmo trabalho maior, tem uma certa independência em relação aos demais. Assim, cada artigo, enquanto for considerado como parte independente do trabalho, em geral, é pensado como uma pesquisa própria, com seus métodos e técnicas próprias, o que propicia uma maior diversificação na formação do pesquisador. O modelo monográfico, por sua vez, como trata o conjunto dos capítulos da tese em termos de uma narrativa contínua e linear, não abre muito espaço para esta diversificação;

(vi) maior rigor – ao escrever os capítulos da tese como artigos e submetê-los às revistas, preferencialmente as de maior conceituação na área, o doutorando é ‘forçado’ a aumentar seu grau de rigor em relação à qualidade do seu próprio

trabalho, visto que este irá passar pelo crivo dos árbitros, além da banca de defesa. No formato monográfico é natural que haja uma certa acomodação do doutorando quanto a este aspecto posto que, a única avaliação à qual o trabalho é submetido é o da banca de defesa, que tem um olhar diferente dos árbitros de uma revista. Como depoimento, minha experiência com o artigo que está publicado em versão *online* na revista *Science and Education* foi um exemplo disto. Enviei o trabalho achando que estava ótimo e quando recebi os pareceres dos árbitros percebi o quanto ele precisava ser melhorado. Isto me levou a aumentar o meu padrão de exigência quanto aos meus trabalhos, a procurar perceber seus limites e deficiências e adotar uma postura mais autocrítica.

Entretanto, como toda escolha, existem também desvantagens em relação ao formato de múltiplos artigos:

(i) fragmentação – o fato de cada capítulo constituir um artigo, que tem certa independência em relação aos demais artigos da tese, pode passar uma falsa idéia de fragmentação do trabalho. Entretanto, isto pode ser superado através de um capítulo introdutório que, ao descrever o contexto no qual o trabalho foi desenvolvido, mostra a conexão entre os capítulos na constituição do trabalho como um todo. O capítulo introdutório da presente tese tenta também cumprir esta função;

(ii) sobreposição – como os artigos que compõem a tese, a despeito de terem alguma independência entre si, integram conjuntamente um mesmo trabalho maior (a tese), em alguns momentos parece inevitável que haja alguma sobreposição. Em meu caso, fiz o máximo esforço para tentar minorar este problema, mas há alguns argumentos que aparecem em um determinado artigo da tese que acaba, inevitavelmente, aparecendo em outro.

Portanto, levando-se em consideração que o número de vantagens é maior em relação ao número de desvantagens e, o que é mais relevante, que o grau de importância das vantagens é maior em relação ao grau de importância das desvantagens, não tenho dúvidas quanto a ter tomado a decisão certa quanto à formatação da tese. Na sequência, seguem os capítulos conforme relatados nesta introdução.

Capítulo 2

Síntese da Pesquisa sobre Abordagem Contextual no Ensino de Física

The History and Philosophy of Science in Physics Teaching: A Research Synthesis of Didactic Interventions

Elder Sales Teixeira · Ileana Maria Greca · Olival Freire Jr

© Springer Science+Business Media B.V. 2009

Abstract This work is a systematic review of studies that investigate teaching experiences applying History and Philosophy of Science (HPS) in physics classrooms, with the aim of obtaining critical and reliable information on this subject. After a careful process of selection and exclusion of studies compiled from a variety of databases, an in-depth review (general description, analysis of quality and summary of the results) of those considered to be of high quality was undertaken. The results indicate positive effects in the didactic use of HPS in relation to the learning of physics concepts, although there was no consensus regarding this. A stronger divergence was found regarding the occurrence of change in students' attitudes towards science. However, HPS may in fact foster a more mature vision in students in respect of their understanding of the Nature of Science (NOS). Moreover, potentially favourable results were found regarding the effects of the didactic use of HPS on the quality of argumentation and metacognition, although further research in this area would appear necessary.

1 Introduction

The incorporation of History and Philosophy of Science (HPS) in physics teaching has a long tradition. It may be traced as far back as Ernst Mach's addresses in the late 19th century. In the second half of the twentieth century, with the support of James Conant and his Harvard Case Studies in Experimental Science, a lasting scholarly tradition of

E. S. Teixeira

Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, av. Transnordestina, s/n, Feira de Santana, Bahia, Brazil 44036-900
e-mail: eldersate@gmail.com

I. M. Greca

Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, Burgos, Spain

O. Freire Jr (✉)

Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia, Bahia, Brazil
e-mail: freirejr@ufba.br

proposals and a production (and assessment of) of instructional materials were undertaken. The most influential of these were the Harvard Project Physics Course, which has recently been updated (Cassidy et al. 2002). Furthermore, this contextual approach has gained an increasing number of advocates and adherents since the end of the 1980s (Matthews 1994), although this does not mean that it has major support amongst physicists and physics teachers. In addition to notable criticisms by the science historians Thomas Kuhn and Martin Klein (Matthews 1994, 71–77), most physicists and physics teachers seem to be indifferent to a contextual approach.

In this conflicting arena there is an urgent need to assess the efficiency of HPS in science teaching in the classroom, especially in relation to conceptual learning, opinions on and attitudes toward the nature of science, argumentation and meta-cognition. This kind of assessment is also needed because in several countries HPS-inspired science teaching has become public policy and there is a need to establish an efficacy for this approach. Several reviews have recently appeared although they have not actually focused on physics teaching. Aikenhead's comprehensive review (Aikenhead 2003) dealt with humanistic perspectives within the science curricula, encompassing both an HPS and Science-Technology-Society (STS) approach. In fact, the studies analyzed regarding student learning mostly utilized an STS approach. Bennett et al. (2007) provides a systematic review to the STS approach, including an in-depth review of experimental designs. Abd-El-Khalick and Lederman (2000a) provide a critical review of attempts to improve science teachers' conceptions of the nature of science. In this way our study aims to enhance this area of research by focusing on the use of HPS in physics teaching.

The aim of the study is to undertake a systematic and critical review of the research published in internationally renowned journals which investigate the experiences of teaching HPS in physics classes, with the aim of systematically gathering critical and reliable information from literature on the didactic use of HPS in this research area. Therefore the question which informed the whole process of selection, exclusion and systematic analysis of the papers in this review was as follows: what reliable information can be obtained from research studies that describe the results of a didactic application of HPS in physics classes?

This particular review is in the tradition of systematic literature reviews, in that, in contrast to traditional forms of narrative review, it enables the gathering of relevant information from the mass of specialised literature in a specific area of research and in a systematic and critical form with regard to the main results of the area in focus, all of which may be extremely beneficial for researchers (Bennett et al. 2005; Dios and Santamaría 2007).

A good example of the use of this technique in science education is found in Bennett et al. (2007) who undertook a systematic review of research about context-based and STS approaches in the teaching of science, evidencing its effects on students' attitudes towards science and their understanding of scientific ideas, amongst other things. The selection criteria for the studies used by the authors were: a broad sweep of databases to identify studies, generic criteria for the judgement of quality and the involvement of more than one researcher in the selection process, judgement etc. The authors arrived at 2,500 studies; after applying predetermined exclusion criteria—established according to the research question—17 studies remained, which were then analyzed in depth. The results of the review indicated, amongst other things, that the approaches investigated resulted in improvements in students' attitudes towards science, without, however, any significant difference in comparison to conventional approaches in terms of the understanding of scientific ideas. The use of the technique of systematic review in this case thus enabled the outlining of a reliable overview of the area mentioned. Similarly, it is the intention of the

present study to achieve an overview of those studies which investigate didactic interventions based on the HPS in physics classrooms.

2 Methodology

The studies included in this systematic review were selected by a consultation of the following databases: *Education Resources Information Center* (ERIC), *SpringerLink* and *Wiley InterScience*, as well as a direct search of the following journals' websites: *Science & Education*, *Science Education*, *International Journal of Science Education*, *International Journal of Science and Mathematical Education*, *Research in Science Education*, and *American Journal of Physics*. The consultation of databases was initially undertaken on a broad basis to increase the validity of the review (Bennett et al. 2007), by the alternately combined use of the following key-words: *science teaching*, *history of science*, *philosophy of science*, *nature of science*, *physics teaching*, *physics education*, which generated a total of 1,183 articles from 31 English-language journal.¹

It is important to stress two things about our choice of studies for analysis. Firstly, the studies selected are: articles published in English; studies in the form of dissertations; book chapters; papers presented in conferences. Evaluation reports or articles published in other languages are therefore not included. This criterion, although restricting the number of research studies concerning this subject—since, for example, Linjse (2004) suggests that most research about the didactic sequences of different approaches is published in local languages—allows for work on those research studies to be made accessible to the international community and to meet the selection criteria of internationally renowned journals.² In fact, this is a quality criterion, since the selected studies had already passed by the criteria of peer-review in acknowledged journals.

After reading the titles, keywords and abstracts, 152 articles directly related to the didactic use of HPS in the teaching of science were selected. Great care was taken with this process; where there was a lack of clarity in the reading of the abstracts, the entire paper was read. Articles were found that had been published from the 1940s to 2008 (when the present review was undertaken) which enabled the outlining of a general overview of publications about the use of HPS in science teaching throughout this period. Following this, the articles were submitted to the following exclusion criteria which were applied once the full paper was read and repeated twice over a three month period, obtaining the same results:

- (1). articles which fail to discuss the teaching of physics but discuss the teaching of science in general or of another specific scientific subject such as biology, chemistry etc. (81 articles were excluded using this criterion);
- (2). articles of a theoretical nature without a didactic application (24 articles were excluded using this criterion);

¹ Articles such as Cooley and Klopfer (1963), Welch and Walberg (1968) or Aikenhead (1974), although approaching the evaluation of specific teaching strategies using history of science (History of Science Cases in the first study and Harvard Project Physics in the others), did not appear in this research database as their main focus was to analyze the evaluation methodology used.

² The same type of systematic review (using the same criteria) is being undertaken by the authors in the five main Brazilian journals in the area of science teaching (and of physics teaching), as well as an important Spanish-language journal. Of the 117 works selected, 11 meet the exclusion criteria for in-depth analysis, which is quantitatively similar to the number found in the present study. This, allied to the fact that many studies presented at local and international congresses are not converted into published articles, suggests that a greater number of studies on this subject are being undertaken than the international community is aware of.

- (3). articles which dealt with general applications of HPS such as the production, use and analysis of didactic materials but without reporting the results of a didactic application in the classroom (35 articles were excluded using this criterion).

Thus, once the exclusion criteria had been applied, 11 studies, with a profile appropriate to the in-depth review remained, that is those research studies which investigated the didactic application of HPS in physics classrooms; these were then analyzed in depth. It should be stressed that we did not use any exclusion criterion relating to experimental and non-experimental research designs, being of the opinion that both designs, when well conducted, offer valuable insights into the process and outcomes of intervention.

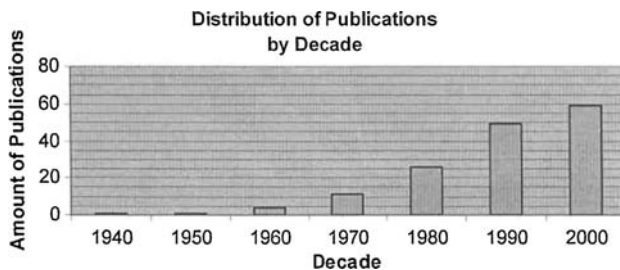
The limited number of articles, as a consequence of the exclusion criteria, offers a preliminary view of the current condition of the research area. Approximately 53% of the studies submitted to the exclusion criteria were not related to physics teaching and approximately 39% were not concerned with research investigating effective intervention in classroom. This demonstrates the relative scarcity of published research of an empirical nature regarding the use of HPS in physics classroom interventions. However, the scope of the survey undertaken, together with the criteria utilized throughout the process of this review, enables the necessary confidence consider it for a good indicator of the state of the art of this area of research.

In order to undertake an in-depth review a detailed description of the studies was initially carried out, followed by a quality analysis and finally a summary of the results reported in those studies considered to be of high quality, with the aim of extracting reliable information about the didactic application of HPS in physics classrooms. This final process was carried out independently by two of the authors of this paper and disagreements (in 2 out of the 11 studies) were subject to discussion until consensus was reached.

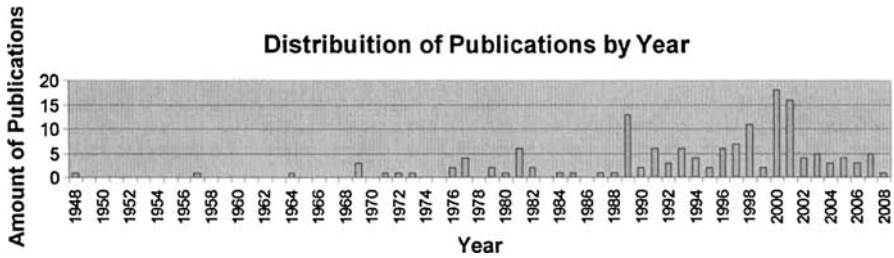
3 Results

3.1 General Overview of Publications which Incorporate HPS in Science Teaching

After the selection of 152 articles it was possible to outline a general overview of the evolution of production in the area of research that investigates the use of HPS in Science Teaching. Figure 3 presents a summary of quantitative results from the selected articles and presents the number of articles by decade, the number of articles by year and the number of articles by journal per year. The graphs below were constructed from these data. A feature which can be immediately observed in Graph 1, which shows the distribution of publication by decade, is the substantial increase in the number of research studies



Graph 1 Distribution of the number of publications selected for the research by decade (total = 152 articles)



Graph 2 Distribution of the number of publications selected by year (total = 152 articles)

published that refer to the incorporation of HPS in science teaching over the last seven decades. This increase, which has been widely documented (Justi and Gilbert 2000; Matthews 1994; Abd-El-Khalick and Lederman 2000b; Rutherford 2001; Robinson 1969), may be explained by the growing preoccupation of researchers regarding the subject in question. Taking this into consideration, Graph 1 can be seen to represent a growth trend for future decades.

In observing Graph 2, distribution of publication by year, we note the presence of a peak in the number of publications between the end of the 1990s and the 2000s. The arguments presented by Matthews (1992a) regarding the tendency for the reestablishment of a connection between HPS and science teaching in the middle of the 1980s provide a straightforward explanation for this occurrence. The perception of a general crisis in science teaching at the end of the 1980s led the community of educators and researchers to undertake a series of conferences in the United States and Europe regarding the teaching of HPS in the science curriculum, and also led to the curriculum reform which occurred during the same period, with the inclusion of HPS and the emergence of appropriate teacher training programmes (Matthews 1992a). All of this resulted, in the 1990s, in the formation of a community focused on investigating and considering this subject, as well as in the creation of the *International History, Philosophy and Science Teaching Group* (IHPST), and in the creation of the specialist periodical *Science & Education*. It is worth noting that 33% of the selected papers and 45% of the studies included in the in-depth review came from this journal (see Fig. 3). As a consequence, there was a substantial increase during this period in the production of studies focused on this subject. In Graph 2 another, more localised peak may also be observed (in 1989) which in this case was due to a special edition dedicated to this subject and published in the periodical *Interchange—A Quarterly Review of Education*.

3.2 General Description of Studies

Having employed the selection criteria, a description of the 11 works selected for analysis was carried out according to the following aspects: country in which the study was undertaken; the involvement of physics as a subject in the study; whether the study considered only the use of the History of Science (HS) in the didactic intervention, only the Philosophy of Science (PS) or both together; the general objectives of the study; how HPS was used in Physics Teaching (PT); teaching level; number of students; length of didactic intervention; teaching strategy employed in the didactic intervention; research design for the teaching strategy; and whether the students' prior knowledge was taken into consideration, either in relation to the subject of physics within the intervention or in relation to HPS. This detailed description is summarised in Tables 1 and 2; the studies are

[illegible]

Fig. 3 Summary of studies obtained by selection (decade, year and journal)

Fig. 3 continued

Table 1 General description of studies

Study	Study country	Subject	Use of		Objectives	How HPS is used in PT	Teaching level	Length of classroom application	Teaching strategy		Previous knowledge	
			HS	PS							In the subject	In HPS
A	Germany	Electrostatics	X		To describe a course in electrostatics focusing on the reproduction of 18th century historical experiments	Through the replication of historical experiments and discussion of original texts related to the experiments	Secondary	One unit	Experimental classes through discovery, coupled with discussions about the development of concepts and their specific experiments		Yes	No
B	Brazil	Optics (Galileo's use of telescope)	X	X	To present evidence about how HPS may contribute to science teaching (ST) and the implications that stem from the way HPS was implemented in ST	Through reading and discussion of historical texts	Secondary	Not specified	Group reading activities followed by discussion of the text, guided by questions proposed and mediated by the teacher	No	No	No
C	Israel	Optics (light and vision)	X	X	To evaluate the effectiveness of a course based on HS concerned with the students' views of NOS and technology and content knowledge	Through the use of historical materials which allows the students to identify their own alternative learning plans regarding the subjects covered	Secondary	One year	Not specified	No	No	No

Table 1 continued

Study	Study country	Subject	Use of		Objectives	How HPS is used in PT	Teaching level	Length of classroom application	Teaching strategy	Previous knowledge	
			HS	PS						In the subject	In HPS
D	Spain	Various	X		To ascertain the perception of science and students' attitudes towards science after using HS in physics and chemistry classes	Through the use of historical materials (including originals) in considering parallels between scientific ideas prevalent during different historical periods and the students' first ideas (psychogenesis)—envisaging a possible conceptual change; problem solving and laboratory work	Secondary	Three years	Not specified	No	No
E	USA	Movement and strength	X		To investigate the effectiveness of historical curricular materials on science learning, NOS and the students' interest in science	Through the use of materials incorporating HS, concerning: similarities between the students' alternative ideas and the historical development of scientific concepts; class discussions about how scientists produce knowledge; short accounts of scientists' personal lives. All with the aim of investigating the learning of concepts, NOS and the students' interest in science	Secondary (equivalent to 8th grade in Brazil)	Four months	Four different teaching strategies using material based on HS, involving discussion sessions and undertaking of experiments	Yes	Yes

Table 1 continued

Study	Study country	Subject	Use of		Objectives	How HPS is used in PT	Teaching level	Length of classroom application	Teaching strategy	Previous knowledge	
			HS	PS						In the subject	In HPS
F	USA	Optics (Fraunhofer lines, speed of light); Hydrostatics (air pressure)	X	X	To evaluate the effectiveness of the HOSC instruction method in changing student understanding of science and scientists, and achievement in the regular content of the physics course	Through presentation of historical science cases using texts containing historical narratives, citations from original articles, as well as experiments and exercises correlating with historic cases.	Secondary	Four weeks	Reading of historic cases as part of students' homework and subsequent classroom discussion following instructional material.	No	Yes
G	Argentina	Electric field lines	X		To analyse the effects of historical materials on the students' conceptual change in relation to the ontology of the concept of field lines	Through the presentation of historical episodes in Faraday's research on electromagnetism and discussions regarding the ontological status which Faraday attributed to field lines and the differences between the concepts of that period and current ones; contextualizing and undertaking experiments similar to Faraday's. All this with the aim of conceptual change	Physics graduate	Not specified	Theoretical, experimental and problem-solving classes; material of a historical nature was used in the theoretical classes of the experimental group	Yes	No

Table 1 continued

Study	Study country	Subject	Use of		Objectives	How HPS is used in PT	Teaching level	Length of classroom application	Teaching strategy	Previous knowledge	
			HS	PS						In the subject	In HPS
H	Nigeria	Cosmological Concepts	X	X	To determine: the nature of traditional cosmological views in the literate and non-literate; whether demographic characteristics affect these views; the impact of a university HPS course on these views	Through reading and discussion of historical material to stimulate rational thought	University students	Not specified	Not specified	Yes	No
I	France	Optics (visual mechanism)	X		To analyse the cognitive impact of a teaching sequence based on an historical text (drama)	Not specified	Secondary (12 to 13 years of age)	Not specified	Drama was used (as a means of depicting a part of HS) as a potentially useful teaching strategy in advancing students' better understanding of NOS. The students were encouraged to identify themselves with old views and overcome these by the strength of the arguments contained within the drama which correspond to the pathway, present in the drama, inspired by HS	Yes	No

Table 1 continued

Study	Study country	Subject	Use of		Objectives	How HPS is used in PT	Teaching level	Length of classroom application	Teaching strategy	Previous knowledge	
			HS	PS						In the subject	In HPS
J	England	Brownian motion	X	X	To evaluate the impact of a course based on HPS concerned with the teaching of Brownian motion and NOS	By introducing one of the teacher-researcher's historical texts and requesting students to write a 'letter to Brown' persuading him to submit his theory to current interpretations. Use of Perrin's book together with a current didactic book for the re-analysis of data concerning Brownian motion with the aim of recalculating the Avogadro number	BA in Education	1 unit (of a 2-year course)	Reading an historic text about the subject, the production of a text by the students and undertaking an exercise in analysis of Perrin's original data	Yes	No
K	Greece	Optics (the formation of images)	X		To investigate the effects of a teaching intervention based on HS aimed at transforming students' representations of the formation of images	After the students had had their perceptions disoriented by taking part in an experiment, Kepler's experiment was reproduced in an interactive environment with the objective of training the students to reorganise their ideas (conceptual change)	Primary and secondary (12 to 16 years of age)	Not specified	Students' experimental tasks to create cognitive disequilibrium and then reorganise their representations through an historic experiment. For each part of the work the students were asked to predict, experiment and confront the results of their predictions and then to rectify or ratify their ideas	Yes	No

Table 2 Research design of the selected studies

Study	Number of subjects	Teaching strategy research design
A	15	Qualitative description of the activity carried out by the author in the classroom without the use of data collection instruments.
B	40	Qualitative research: observation and video recording of the classes for episode analysis. The researchers designed the activity, conducted the research (gathered and analyzed data), but did not carry out the intervention.
C	141 (exp.) + 93 (control) = 234	Quali-quantitative research: questionnaires on students' views about science (where open and multiple choice questions without a provided context were selected from previously performed studies of the subject) and a conceptually-oriented test for knowledge evaluation (test items were also taken from previous studies of students' knowledge of optics) about the subject were applied simultaneously to all groups in natural classroom settings after the intervention and evaluated independently in qualitative and quantitative analysis; open-ended questionnaires about the subject and interviews of some students and teachers from the experimental groups; analysis of frequencies of specific categories developed for each aspect of the research (opinion of science and content knowledge). The researchers prepared the textbook and conducted the research (gathered and analyzed data) while volunteer teachers without experience in HPS developed the experimental unit.
D	233 (exp.) + 694 (control) = 927	Quantitative research using three different post tests (on the development of science and the contribution of the scientist; social aspects of history; interest and attitudes towards science) with open questions in the absence of a provided context and qualitative observations. The researchers prepared a course and conducted the research (gathered and analyzed data); the researchers and others teachers developed the intervention.
E	91 randomly distributed in four groups (three groups with experimental intervention)	Quantitative research using instruments (pre- and post- test), such as demographic information (IQ level and pre-grades), questionnaires about nature of science previously used in others studies about the subject (POSE- Perspective on Scientific Epistemology), conceptual mapping for measure of meaningful learning, interest survey (items on a six points Lickert scale) and semi-structured interviews conducted with 6 students randomly chosen from each class. The data was analyzed using multivariate analysis of variance. The researchers elaborated the curricula for three different teaching strategies (with the "control group" using a traditional teaching strategy) and conducted the research (gathered and analyzed data) a volunteer teacher without experience in HPS developed the curricula.
F	15 experimental groups and 13 control groups (c.580 subjects in total)	Quantitative research using experimental design: pre- and post-test on understanding science for the students (TOUS test) and a related pre-test for teachers, pre-test to measure student scholastic aptitude (Otis Mental Ability Test) and post-test on the specific subject (Cooperative Physics Test), all tests published by national testing services. Groups were randomly selected and class means were used as the unit of analysis, (of variance with covariance adjustment). The researchers designed the activity and conducted the research (gathered and analyzed data).

Table 2 continued

Study	Number of subjects	Teaching strategy research design
G	33 (exp.) + 33 (control), randomly distributed = 66	Quantitative research using pre- and post-test (multiple choice questions to elicit students' ontological views about lines of forces, with the possibility of choosing more than one option), students' statements justifying their choices and interviews centred on two situations. Answers were analyzed using propositional analysis and analysis of variance. The researcher designed the activity and conducted the research (gathered and analyzed data).
H	105 (exp.) + 138 (control)	Quantitative research using a pre- and post-test questionnaire (TCT- Traditional Cosmological Test) to determine cosmological ideas, consisting of fictitious stories followed by statements on which subjects express their opinion on a three-point Likert scale as well as a list of traditional cosmological ideas common in Southern Nigeria and rated from 0 to 10 according to the way such concepts influence their viewpoints about natural phenomena. The data was analyzed using multivariate analysis of variance and factor analysis.
I	12	Qualitative research in the form of a "teaching experiment", using interviews centred on the drama developed by the researchers about the way vision operates. The researchers designed the activity, carried out the intervention and conducted the research (gathered and analyzed data).
J	23	Qualitative research using a final questionnaire and certain students' written materials (the 'letters to Brown'). The researcher designed the activity, carried out the intervention and conducted the research (gathered and analyzed data).
K	48	Quali-quantitative research using audio-taped semi-structured interviews applied pre- and post-intervention, with open questions adjusted to the empirical content of specific experimental situations regarding the formation of images, designs on schematic reproductions of the experimental setting and special protocols to encode relevant non-verbal responses. The data was analyzed using frequency analysis, goodness-of-fit test and the Kruskal-Wallis non-parametric test. The researcher designed the activity, carried out the intervention and conducted the research (gathered and analyzed data).

denominated in the following tables by the letters **A, B, C,³ D, E, F, G, H, I, J** and **K** (referenced at the end of the article)

It is worth noting that the 11 works selected for the in-depth review come from a variety of countries across almost all continents: 5 works are from Europe; 2 from South America; 2 from North America; 1 from Africa and 1 from the Middle East. There is also variety in terms of the subjects covered in the classroom applications of HPS with Optics prevailing with 5 works, followed by Electricity and Mechanics with 2 works each, and Modern Physics with 1 work. One of the studies does not specify the subject, suggesting that HPS was used as an approach to a variety of topics. PS appears in conjunction with HS in only 5 out of the 11 studies; the other 6 only make reference to the didactic use of HS without PS, which may represent a difficulty in didactically presenting HS in an epistemologically contextualised way (Matthews 1994).

Overall, the objectives of the works are concerned with the investigation of the effects of the use of didactic materials and/or strategies in teaching based on HPS in terms of a better understanding of concepts, ideas about the Nature of Science (NOS) and the subjects' attitudes toward science. In a majority of the studies, these objectives are associated with the idea of conceptual change concerned with similarities between the students' alternative ideas and the historical development of scientific concepts. Although the idea of parallelism between these two processes—ontogenetic and phylogenetic—has already been considerably criticised in the literature (Matthews 1994; Driver and Easley 1978; Rowlands et al. 1999; Moreira and Greca 2003), it remains present in the arguments of researchers who explore the didactic use of HPS.

The studies exhibit a variety of teaching levels, and examine research subjects at three educational stages (primary, secondary and higher). However, the majority of research is concentrated at the primary and secondary stages demonstrating a need for more studies exploring this subject at university level, especially studies involving mature students with the ability to understand historic-epistemological issues.

Study **A** describes a didactic unit of electrostatics with a class of secondary school students. This was achieved by replicating a classroom where various historical electrostatic experiments were carried out, enabling the students to have their experiences augmented by discussions supported by historic texts that explained the development of concepts as well as the experiments themselves and contained views that took into consideration the changes in experiment style that occurred towards the end of the eighteenth century. As electrostatics was a compulsory course subject, the teaching of the history of science can be seen, according to the author, from the perspective suggested by Matthews (1994) of a didactic approach integrated with HS.

Study **B** involves a qualitative research with a group of secondary school students on the historical development of Optics, especially events involving Galileo using a telescope. Group activities took place in a classroom with questions proposed and mediated by the teacher. After reading and analyzing historical texts there were activities in which students discussed the subject with a view to better understanding essential aspects of science, as well as learning how to develop arguments and appreciate attitudes as to the direction of science. The authors presuppose HPS to be an *“integral part of scientific knowledge, and therefore, they must be studied in science courses”* (Carvalho and Vannucchi 2000: 427). In this way, they incorporate the view of Matthews (1994) as an integrated way of including HPS in the science curriculum in terms of content: [HPS] *“as elements that are*

³ This study has been published in two articles: (a) Galili and Hazan (2000); (b) Galili and Hazan (2001).

inherent in science itself, since a well-based understanding of science necessarily implies a knowledge of its history” (Matthews 1994; Carvalho and Vannucchi 2000: 428).

Study C (published in two articles) investigated the effects of a one year Optics course that incorporated historical materials about light and vision models on students’ perceptions about NOS and technology and the extent of subject knowledge. HPS was introduced through historical texts, in terms of drawing parallels between the students’ conceptions and historical conceptions of the concepts of light and vision, although no specific teaching strategy was suggested to the teachers who ran the course.

The principal focus of Study D was to show that an appropriate introduction to the history and sociology of science through the use of historical materials such as “*biographies, original papers, reports on STS in history or videos showing the making and growth of major concepts in P&C*” (Solbes and Traver 2003: 703), in a secondary school physics and chemistry course, can contribute to a better perception of science as well as a better appreciation of science by the students. According to the authors, the historical approach takes into account the idea of overcoming a purely empiricist image of science; promoting conceptual change—drawing parallels between historic ideas and students’ preconceptions—comprehension of NOS and scientific activity; comprehension in relation to STS; the role of women in science, etc. The authors considered this historical approach in an integrated way, adopting a teaching and learning strategy during the research process, as suggested by Gil et al. (1991). However they did not share details of how this integrated strategy was implemented in the classroom.

Study E investigated the effectiveness of curricular materials that incorporated the history of science in dealing with force and movement units in three experimental groups with the aim of attaining a conceptual understanding and knowledge about NOS and a better appreciation of science by the students. A different strategy for teaching science history was used in each group: one considered the similarity between the students’ alternative ideas and scientific concepts that encompass conceptual change—at which point the authors cited, amongst others, Wandersee (1985) and Seroglou et al. (1998); another strategy centred on discussions about how scientific knowledge is produced, with a view to better understanding NOS—here the authors drew heavily on the works of Abd-El-Khalick and Lederman (2000a, b) amongst others; a third strategy used short personal accounts from scientists in a style unconnected to scientific concepts and NOS—here the authors drew principally on Egan’s story form (1985, 1989).⁴

Study F looked to evaluate the effectiveness of the HOSC (History of Science Cases) instructional method in students’ understanding of the NOS and the subject of physics. The study involved diverse groups of secondary school physics, chemistry and biology students, although the present research summary restricted the scope of the analysis to physics groups. During the four weeks in which the investigation was carried out the physics groups looked at Optics (Fraunhofer lines and speed of light) and Hydrostatics (atmospheric pressure). The teaching strategy involved reading and discussing history of science cases, utilizing historic texts along with original articles, experiments and exercises relating to the cases.

Study G analyzed the effects of historically informed instructional material on university physics students’ ontological understanding of the concept of field lines, with a

⁴ Even though the strategy presented by Egan is located, according to Matthews (1994), in the Storyline Approach, representing a middle road between the “add-on” and integrated approaches, the authors of Study E explicitly used scientists’ life stories (in one of the didactic strategies) in a way that was disconnected from scientific concepts and NOS.

view to providing conceptual change. Reading and classroom discussions of historical stories surrounding Faraday's research on electromagnetism were used to compare the ontological status of field lines, as characterised by Faraday, with contemporary conceptions and had the aim of incorporating science history into the subject. Laboratory classes were held involving similar experiments to those of Faraday and there were also lessons in which problems were solved.

Study **H** aimed to determine the nature of traditional cosmological visions of Nigerian students with differing levels of education (including illiteracy) to ascertain whether certain demographic characteristics interfere in such visions and to analyse the impact of a university course containing HPS on these visions. As the HPS-based teaching strategy only involves university students, the present analysis only contains results pertinent to them. The study used a strategy of incorporating HPS into the subject through reading and discussions of a variety of historical texts including Greek cosmology, medieval astronomy and African cosmology; the idea being to stimulate students' rational thought processes and so increase the likelihood of their choosing a scientific explanation in preference to one from the African cosmological tradition.

Study **I** investigated the effects of a written teaching resource presented in dramatic form: a debate inspired by the history of the mechanics of vision, with a view to acquiring knowledge of how vision functions, improving the development of argument through speaking activities and making the students more conscious of their own cognitive processes. The study involved a strategy of teaching physics that integrated science history. This was based on Monk and Osborne's 1997 model of incorporating HPS in science teaching, which drew parallels between the historical development of scientific ideas and alternative routes for students to acquire knowledge of the mechanics of vision.

Study **J** aimed to evaluate the impact of an HPS-based course on teaching Brownian motion, and, at the same time, increase awareness of NOS within a group of undergraduate students of education. The study utilized an historical text written by the researcher himself, a book by Jean Perrin and another didactic contemporary text to reappraise data relating to Brownian motion. The study used an integrated teaching strategy along with a reading and discussion of the texts; a production of a text by the students as well as an exercise that re-analyzed Perrin's data.

Study **K** investigated the effects of a teaching intervention based on science history. A teaching strategy integrating science history was carried out in two instances: the first aimed to destabilize the students' alternative representations of image formation, and the second, reproducing Kepler's historical experiment, aimed to transform the students' portrayal of light emission and image formation

As evidenced above, these studies demonstrate a variety of objectives in relation to the use of HPS in physics classes:

- In seven studies, HPS was used to acquire conceptual knowledge (the majority of studies supporting the idea of similarity between students' alternative conceptions and historically conceptualized physical concepts).
- In five studies HPS was used to attain a better understanding of aspects of NOS (according to the authors, a better understanding of science, its processes and of scientists themselves, contributed to suppressing more naive views about science, and so contributed to a better understanding of the role of science in contemporary society);
- In four studies HPS was used to improve the attitude of students towards science (getting to know the history of science and scientists can help motivate students so they become interested in the study of science, especially physics)

- In two studies HPS was used to promote skills in structuring arguments (involving students in activities that recreate historical physics debates enables them to better develop their arguments).
- In one study HPS was used to develop metacognition (involving students in historical debates enhances their capacity to learn about their own thought processes)

Using the classification proposed by Matthews (1994) about how to include HPS in science teaching, the majority of studies (A, B, C, D, G, H, I, J) can be categorised as having an “integrated” strategy, that is, where the science content is studied in such a way that content and historical development overlap; study F used an “add-on” strategy in which a history of science unit was added to the science course using a traditional, rather than historical, teaching approach; study E utilized two forms of approach in different didactic proposals and study K used HPS in an integrated form with a strategy of teaching–learning whilst carrying out research in the classroom.

The didactic materials that incorporated HPS were texts in the form of historical narratives (in ten of the studies), biographies of scientists (one study), replications of historical experiments (three studies), lists of exercises with historically conceptualized problems (three studies), videos about the evolution of scientific concepts (one study) and short stories about scientists’ lives (one study). Some of the studies used more than one type of the aforementioned didactic materials.

The teaching strategy employed in the classroom was not specified in three of the studies analyzed. Most (c. 70%) of the studies involved theoretical discussions supported by historical texts. A significant number of works (c. 60%) incorporated HPS in experiments in the classroom, reconstructing experiments from the history of the studied subject. In addition, two studies explored teaching strategies that focused on historically contextualised problem-solving. Since these strategies are not mutually exclusive, in some studies an overlap of strategies occurred in the didactic intervention. One negative aspect noted was that few of the studies justified the teaching strategies employed by elaborating on their pedagogical references.

The research designs presented a balanced portfolio, with 4 qualitative, 5 quantitative and 2 quali-quantitative studies. The preferred tools for data collection in the majority of the studies were questionnaires containing open or multiple choice questions (in 7 of the studies) as well as semi-structured interviews (5 studies), being similar to the findings of Bennett et al. (2007) in their review of the STS approach. In 3 out of 4 studies that used questionnaires regarding the nature of science, the questionnaire items, most of which lacked context, were selected from previously performed studies. In two studies, interviews were subsequently carried out on a reduced number of subjects in order to clarify data obtained via the questionnaires; in the remaining three studies, interviews were developed out of specific situations, two of which involved experiments. It is interesting to note that none of these studies used interviews as the principal instrument to elicit students’ epistemological views.

None of the studies, whether dealing with epistemological visions or conceptual or cognitive skills, have subsequently re-evaluated the effects of their interventions. As establishing and maintaining (epistemological or cognitive) change can be inherently problematic (Chi et al. 1994) the impact of the results may be less than expected. Additionally, none of the studies used regular final examinations as research instruments. Whilst this would normally be acceptable given the scope of the research and/or the limited time of the interventions, nevertheless, it would have been interesting if Study C (which was the only one dealing with the effects of an HPS approach to student knowledge in the space of

a year) also compared the control and the experimental group achievements with an instrument independent of the HPS approach. This would have allowed a true comparison of different approaches to conceptual achievements.

In terms of the length of interventions taking the HPS approach, only two studies (**C** and **D**) implemented them throughout the year whereas the others involved intervention periods that were more targeted, lasting a few months or for just one unit or course theme. An evaluation of the review articles' results should therefore take into consideration these short time periods when assessing the effectiveness of an HPS approach.

The researchers developed the teaching sequences and also gathered and analyzed the data for all of the studies. Only one study (study **F**) took into consideration and analyzed teachers' conceptions about science. In 5 out of 9 cases the researchers were also responsible for the intervention itself (intervention responsibility being unclear in two of the studies). Although this procedure is not unusual in the area of science education research, it may bias the related findings of the effects of HPS on physics teaching by raising ethical issues surrounding the possible vested interests of researchers in reporting the success of their interventions. That said, the fact that researchers have responsibility for an intervention puts them in a better position to explore it further, although, in this case, the possibility of "extending" their findings would be limited, especially when problems relating to teachers' beliefs about science and classroom practice are taken into account (Abd-El-Khalick and Lederman 2000a).

It is worth noting that 7 of the 11 studies were interested in assessing the research subjects' previous knowledge of physics-related topics. In fact, when seeking to evaluate the effects of a specific intervention prior to the intervention itself, the methodological importance of understanding the research subjects' views on the topic in consideration is well-known. In general, this seems to have been taken into consideration in those research studies regarding the understanding of concepts. However, the same preoccupation is not evident regarding HPS, given that only 2 of the 11 works analyzed here sought to ascertain the students' prior ideas about elements of an epistemological nature. As has already been pointed out, the overall objectives presented in the research studies were to investigate the effects of didactic interventions that use HPS for improvement in understanding specific concepts of physics, views about NOS and students' attitudes to science, as well as in aspects of metacognition and argumentation and, for this reason, there is an urgent need to ascertain the extent of the research subjects' field knowledge, since it would be a methodological error to presuppose that research subjects either have no prior knowledge regarding these matters or that their knowledge is unsuitable.

3.3 Quality Analysis of the Studies

Following a general description of the studies, a quality analysis was undertaken, taking into account the following aspects in the articles analyzed: reliability of instruments (only for the quantitative studies); validity of instruments; reliability of results (only for the qualitative studies); validity of results, appropriate sample size, appropriate data collection techniques and discussion of study limitations (for both qualitative and quantitative studies). Given the diversity of meanings associated with concepts of reliability and validity, we note that the following criteria were used in this research which were similar to those found in Bennett et al. 2007; White and Arzi 2005; Munby 2003; LeCompte and Goetz 1982:

- instrument reliability—criteria found in appropriate statistical methods used in quantitative studies, such as correlation factors;
- instrument validity—measures taken, as mentioned in the studies, in data collection processes such as piloting, language equivalence, use of instruments validated in previous studies or by any of the usual criteria (content, construct or related to criteria) etc.;
- reliability of results—criteria in qualitative studies related to agreement in analyses independent of the researchers;
- validity of results—measures to seek out and eliminate errors or biases, as well as alternative explanations to those described at the conclusion of the studies.

This quality analysis was undertaken separately by two of the study's authors via a thorough reading of the entire papers. Inter-rater agreement on the quality judgments over the 11 studies was 72%, and final results were achieved through discussion and consensus. Table 3 presents a summary of this analysis, showing which of the aforementioned items appear in the analyzed studies, as well as the quality concept attributed to each study. We attribute concept M (which indicates medium quality) when only two of the aforementioned items are found in the work and concept H (which indicates high quality) when three or more of these items are found.

3.4 Observed Results from the Studies

Of the studies analyzed, 9 were categorised as concept H, being **B, C, D, E, F, G, H, I** and **K** (see Table 4), with studies **A** and **J** being categorised as concept M. The results reported in the conclusions of the 9 high quality studies, were then summarized with the aim of eliciting the salient points regarding the didactic application of HPS in physics classrooms, thus enhancing the knowledge of researchers who work in this area.

Seven (**C, E, F, G, H, I** and **K**) of the nine studies had the objective of evaluating the effects of HPS in learning the subject included in the didactic intervention. Studies **E** and **F** reported that there were no differences between the experimental and control groups

Table 3 Summary of quality analysis of studies

Studies	Reliability	Validity	Instrument Validity	Appropriate sample size	Appropriate data collection technique	Limitations described	Quality of Study
A		✓				✓	M
B		✓			✓	✓	H
C	✓	✓	✓	✓	✓		H
D		✓	✓	✓	✓		H
E	✓	✓	✓	✓	✓		H
F	✓	✓	✓	✓	✓	✓	H
G	✓	✓	✓	✓	✓		H
H	✓	✓	✓	✓	✓		H
I		✓	✓	✓	✓		H
J		✓				✓	M
K	✓		✓	✓	✓		H

M indicates medium quality (where up to two items are found); H indicates high quality (where three or more items are found)

Table 4 Summary of results reported in the studies

Studies	Understanding concepts	Nature of science	Argumentation	Metacognition	Attitudes towards science
B		✓	✓		x
C	✓	✓			✓
D		✓			✓
E	x	✓			x
F	x	✓			
G	✓				
H	✓				
I	✓		✓	✓	
K	✓				

✓ Indicates report of favourable results; x indicates report of no favourable results

regarding the learning of physics concepts. The other studies reported positive conclusions in terms of learning as an effect of the didactic use of HPS, while study **H** did not indicate the occurrence of conceptual change, but rather of a change in the research subjects' preference for the scientific concepts, without relinquishing the prior concept. Study **C** also made no reference to the occurrence of conceptual change—given that it did not take into account prior student knowledge—but only compared, at the end of the HPS tuition, the benefits of this tuition for the experimental groups as compared to the control groups. Thus, studies **G**, **I** and **K** concluded that there was a conceptual change, although **K** reported a resistance to this change in the group studied.

We can thus infer that a majority of studies that focused on this area reported favourable results, although there was no consensus about the positive effects of the didactic use of HPS in terms of concept learning. Similarly, there was no agreement about the occurrence of conceptual change, although it should be noted that there is considerable volume of literature criticising the conceptual change approach (Mortimer 1995; Millar 1989; Matthews 1992b; Marín 1999), which means that this lack of agreement cannot be linked to the didactic approach under consideration—the use of HPS—but to the possibility that this change may occur, whichever teaching approach is employed.

Studies **B**, **C**, **D**, **E** and **F** sought to investigate the effects of the didactic application of HPS on the research subjects' understanding of NOS in their respective pieces of research, while study **C** also explored these effects in relation to STS. All the studies, without exception, presented entirely favourable results. This shows that in the teaching of physics the use of HPS-based approaches may in fact foster a more mature student vision in respect of their understanding of NOS. Thus, physics curricula and/or teaching that include in their objectives provision for the students' better understanding of NOS, may find an effective ally in HPS.

The same studies, with the exception of **F** which investigated the effects of the didactic use of HPS in regards to NOS, also investigated those effects relating to the subjects' attitudes to science. The reported conclusions, however, do not concur. Studies **C** and **D** report positive conclusions concerning the students' interest in scientific undertakings, scientists and established theories, as well as in the processes of the evolution of science in relation to STS. Study **B** concluded that, even following a didactic intervention based on HPS, the students insisted on receiving affirmations about the 'status' of absolute truths from the teacher, thus demonstrating little interest in the demystification of science. In

study **E** it was reported that, although accounts of scientists' lives aroused the students' interest, discussions about the scientific method without the use of these accounts, reduced their interest in science. Thus, according to these research studies, it is not possible to confirm that approaches in physics teaching based on HPS lead to an increase in students' interest in science, suggesting that more careful investigation is needed in this area.

Only 2 studies (**B** and **I**) were concerned with the effects of the didactic use of HPS on the research subjects' level of argumentation. Each of these reported favourable conclusions regarding improvement in the quality of the students' arguments, both in terms of debating skills and in favouring more abstract explanations. This confirms findings from the literature dedicated to this line of research—that the adoption of science teaching strategies which promote argumentation is an essential element in science education because it offers many benefits including that of providing students with the opportunity to engage with the culture of science and allowing the development of meta-cognitive features as well as the development of different forms of thought (Abi-El-Mona and Abd-El-Khalick 2006; Erduran et al. 2004; Albe 2008; Munford and Zembal-Saul 2002; Jiménez-Aleixandre et al. 2000a, b). However, the fact that only 2 studies explored this aspect also confirms that this approach is rarely adopted in science teaching classrooms (Abi-El-Mona and Abd-El-Khalick 2006) and especially, in the teaching of physics, demonstrating the necessity for more research to be undertaken in order to evaluate the potential of HPS resources in promoting argumentation.

We should point out that only one study contained results relating to metacognition. Study **I** reported as one of its conclusions that the teaching–learning sequence based on HPS employed in the research made the students more aware of their own cognitive processes, enabling some of them to analyse those elements that supported changes to their spontaneous ideas. This demonstrated both the potential of a teaching approach supported by HPS for metacognition (Seroglou and Koumaras 2001), as well as the need for greater research effort to investigate this matter.

Finally, it may appear strange that a review of the use of HPS in physics teaching did not take into account an analysis of the experiences of the Harvard Project Physics (HPP), probably the most well-known instructional material for HPS-informed physics teaching. History may explain this absence. The criteria we have used to screen the bibliographic data bases emphasized the use of HPS in physics teaching. When HPP first appeared and was analyzed in the late 1960s and early 70s, the expression HPS was not widely used in science teaching. For instance, Holton (1964), presented it as a “connective approach” and the lexicon of the time referred to HPS as having a “humanistic approach” (Welch 1973). In fact, HPS in science teaching only matured under this title in the late 1980s and early 90s. Thus the criteria adopted in our review did not allow us to include studies on HPP within the chosen sample. However, any review of the use of HPS in physics teaching would be deemed a failure if it did not include a reference to such an experience. For this reason, we refer the reader to the relevant literature for an assessment of this experience.

“*The most compelling single summative assessment study*” on humanistic approaches to science teaching “*was the complex, multi-faceted, randomized research design for*” HPP, according to Aikenhead (2003: 60). This study, coordinated and reviewed by Wayne Welch, was an extremely sophisticated quantitative study, carried out over four years at a national level in the US, with experimental and control groups. On the advantages of the HPP course, Welch (1973: 375) reported: “*students in HPP find the course more satisfying, diverse, historical, philosophical, humanitarian, and social; their questionnaire responses suggest a belief that mathematics is not essential to understanding physics; the historical approach is interesting; the book was enjoyable to read; their class finished the text; and*

they hoped the book would not be changed.” However, concerning conceptual learning Welch also concluded that the results “*showed no significant difference between the HPP and non-HPP groups.*” This conclusion was challenged by Aikenhead (1974), who undertook a revised analysis of the tests and arrived at different conclusions. Indeed, after “deleting the frivolous and incomplete answer sheets, Aikenhead recalculated the gain scores and found the HPP group had significantly out-performed the non-HPP group” (Aikenhead 2003). Today, Aikenhead’s revision of the HPP tests may still be considered a caveat for the kind of data that should be used in quantitative assessments. Even without Aikenhead’s revision, the balance of assessment is widely favorable to the HPP experience.

4 Conclusion

The first point to consider is that the procedures used in this study seem to be a reasonably effective way of undertaking a systematic review of literature that refers to the didactic use of HPS in science teaching, and in particular, physics teaching. The research summary reported here allowed us to outline, with the aid of tables and graphs, a general overview of research studies on this subject, published in internationally renowned journals and also to gather critical information in a secure manner, which may be of value to this area of research.

The vast majority of the studies selected for analysis support the idea of similarity amongst students’ spontaneous understanding of scientific concepts and the historical development of these concepts, with the aim of attaining a conceptual change, despite the large amount of criticism found in the literature about this type of approach. In spite of the presence of a variety of teaching strategies based on HPS, comparatively few of them provided the pedagogical references to justify the use of these strategies, and few were concerned with assessing the students’ prior knowledge of HPS.

The studies analyzed present various ways of how to utilize HPS in the teaching of physics: in relation to teaching objectives (learning concepts, NOS, attitudes, argumentation and metacognition); in relation to teaching strategies (integrated with the subject of physics, integrated with another teaching strategy and non-integrated); in relation to didactic materials (historical narratives, biographies, replicas of historical experiments, historically contextualized problems and stories of scientists’ lives).

Of the 11 studies analyzed, 9 were considered to be of high quality according to the criteria set by the present study, which is a favourable indicator for this area of research. The results reported the occurrence of positive effects in the didactic use of HPS in the learning of physics concepts, despite there being no consensus about this, and they also indicated a lack of agreement about the occurrence of conceptual change. Greater research efforts are therefore needed to investigate these aspects, especially when the aforementioned limitations in research procedures are taken into account. In the same way, no consensus was found as to how HPS promotes improvements in the students’ attitudes to science, which also leads us to conclude that this subject needs further investigation. On the other hand, this type of approach appears to promote a more mature vision in respect of the students’ understanding of NOS, which should be taken into consideration when planning curricula and/or physics teaching strategies. Favourable results were also found when looking at the effects of the didactic employment of HPS on the areas of argumentation and metacognition, despite the dearth of studies in the analysis dealing with these areas. This demonstrates that potentially important areas are being explored which warrant a higher position on the HPS-based physics teaching research agenda.

In conclusion, despite the limited number of studies included in the final analysis, the actual scope of the survey, as well as the selection and exclusion criteria and the in-depth analysis guided by the research question, allows the authors to consider this research synthesis a reliable indicator of the state of art of this particular area of research.

References

- Abd-El-Khalick, F., & Lederman, N. G. (2000a). Improving science teachers' conceptions of nature of science: A critical review of the literature. *International Journal of Science Education*, 22(7), 665–701.
- Abd-El-Khalick, F., & Lederman, N. G. (2000b). The influence of history of science courses on students' views of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(10), 1057–1095.
- Abi-El-Mona, I., & Abd-El-Khalick, F. (2006). Argumentative discourse in a high school chemistry classroom. *School Science and Mathematics*, 106(8), 349–361.
- Aikenhead, G. S. (1974). Course evaluation II: Interpretation of students performance on evaluate tests. *Journal of Research in Science Teaching*, 11(1), 23–30.
- Aikenhead, G. S. (2003). Review of research on humanistic perspectives in science curricula. Paper presented at the European science education research association (ESERA) 2003 Conference. Noordwijkerhout, The Netherlands, August 19–23.
- Albe, V. (2008). When scientific knowledge, daily life experience, epistemological and social considerations intersect: Students' argumentation in group discussions on a socio-scientific issue. *Research in Science Education*, 38, 67–90.
- Bennett, J., Lubben, F., & Hogarth, S. (2007). Bringing science to life: A synthesis of the research evidence on the effects of context-based and STS approaches to science teaching. *Science Education*, 91, 347–370.
- Bennett, J., Lubben, F., Hogarth, S., & Campbell, B. (2005). Systematic reviews of research in science education: Rigour or rigidity? *International Journal of Science Education*, 27(4), 387–406.
- Cassidy, D., Holton, G., & James Rutherford, F. (2002). *Understanding physics*. New York: Springer.
- Chi, M., Slotta, J., & Leeuw, N. (1994). From things to processes: The theory of conceptual change goes learning science concepts. *Learning and Instruction*, 4, 27–43.
- Cooley, W. W., & Klopfer, L. E. (1963). The evaluation of specific educational innovations. *Journal of Research in Science Teaching*, 1, 73–80.
- Dios, J. G., & Santamaría, A. B. (2007). Revisión Sistemática y Metanálisis (I): Conceptos Básicos. *Evidencias en Pediatría*, 3, 107.
- Driver, R., & Easley, J. (1978). Students and paradigms: A review of literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in Science Education*, 5, 61–84.
- Egan, K. (1985). Teaching as story-telling: A non-mechanistic approach to planning teaching. *Journal of Curriculum Studies*, 17(4), 397–406.
- Egan, K. (1989). *Teaching as story telling: An alternative approach to teaching and curriculum in the elementary school*. Chicago: University of Chicago Press.
- Erduran, S., Simon, S., & Osborne, J. (2004). TAPing into argumentation: Developments in the application of Toulmin's argument pattern for studying science discourse. *Science Education*, 88(6), 915–933.
- Gil, D., Carrascosa, J., Furió, C., & Martínez, J. (1991). *La Enseñanza de las Ciencias en la Educación Secundaria*. Barcelona: ICE-Horsori.
- Holton, G. (1964). The goals for science teaching. In S. C. Brown, N. Clarke, & J. Tiomno (Eds.), *Why teach physics?*. Massachusetts: M.I.T Press.
- Jiménez-Aleixandre, M., Muñoz, C., Cuadrado, V. (2000a). Expertise, argumentation and scientific practice: A case study about environmental education in the 11th Grade. Paper presented at the annual meeting of the national association for research in science teaching (NARST), New Orleans, L.A., April (ERIC Document Reproduction Service no ED 439 960).
- Jiménez-Aleixandre, M., Rodríguez, A., & Duschl, R. (2000b). "Doing the lesson" or "doing science": Argument in high school genetics. *Science Education*, 84(6), 757–792.
- Justi, R., & Gilbert, J. (2000). History and philosophy of science through models: Some challenges in the case of 'the atom'. *International Journal of Science Education*, 22(9), 993–1009.
- Lecompte, M. D., & Goetz, J. P. (1982). Problems of reliability and validity in ethnographic research. *Review of Educational Research*, 52(1), 31–60.
- Linjse, P. (2004). Didactical structures as an outcome of research on teaching-learning sequences? *International Journal of Science Education*, 26(5), 537–554.

- Marín, N. (1999). Delimitando el Campo de Aplicación del Cambio Conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, 17(1), 80–92.
- Matthews, M. (1992a). History, philosophy and science teaching: The present rapprochement. *Science & Education*, 1(1), 11–47.
- Matthews, M. (1992b). Constructivism and empiricism: An incomplete divorce. *Research in Science Education*, 22(1), 299–307.
- Matthews, M. (1994). *Science teaching: The role of history and philosophy of science*. New York: Routledge.
- Millar, R. (1989). Constructive criticisms. *International Journal of Science Education*, 11(5), 587–596.
- Monk, M., & Osborne, J. (1997). Placing the history and philosophy of science on the curriculum: A model for the development of pedagogy. *Science Education*, 81(4), 405–424.
- Moreira, M. A., & Greca, I. M. (2003). Cambio Conceptual: Análisis Crítico y Propuestas a la Luz de La Teoría del Aprendizaje Significativo. *Ciência & Educação*, 9(2), 301–315.
- Mortimer, E. F. (1995). Conceptual change or conceptual profile change? *Science & Education*, 4(3), 265–287.
- Munby, H. (2003). Educational research as disciplined inquiry: Examining the facets of rigor in our work. *Science Education*, 87(2), 153–160.
- Munford, D., Zembal-Saul, C. (2002). Learning science through argumentation: Prospective teachers' experiences in an innovative science course. Paper presented at the annual meeting of the national association for research in science teaching (NARST), New Orleans, L.A., April (ERIC Document Reproduction Service no ED 465 520).
- Robinson, J. T. (1969). Philosophical and historical bases of science teaching. *Review Educational Research*, 39(4), 459–471.
- Rowlands, S., Grahlan, T., & Berry, J. (1999). Can we speak of alternatives frameworks and conceptual change in mechanics? *Science & Education*, 8, 241–271.
- Rutherford, J. F. (2001). Fostering the history of science in American science education. *Science & Education*, 10(6), 569–580.
- Seroglou, F., & Koumaras, P. (2001). The contribution of the history of physics in physics education: A review. *Science & Education*, 10(1), 153–172.
- Seroglou, F., Koumaras, P., & Tselfes, V. (1998). History of science and instructional design: The case of electromagnetism. *Science & Education*, 7, 261–280.
- Wandersee, J. H. (1985). Can The history of science help science educators anticipate students' misconceptions? *Journal of Research in Science Teaching*, 23(17), 581–597.
- Welch, W. W. (1973). Review of the research and evaluation program of Harvard project physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 10(4), 365–378.
- Welch, W. W., & Walberg, H. J. (1968). A design for curriculum evaluation. *Science Education*, 52(1), 10–17.
- White, R. T., & Arzi, H. J. (2005). Longitudinal studies: Designs, validity, practicality, and value. *Research in Science Education*, 35, 137–149.

List of Studies Selected for Analysis

- A** Heering, P. (2000). Getting shocks: Teaching secondary school physics through history. *Science & Education*, 9(4), 363–373.
- B** Carvalho, A. M. P., Vannucchi, A. I. (2000). History, philosophy and science teaching: Some answers to “how?” *Science & Education*, 9(5), 427–448.
- C** (a) Galili, I., Hazan, A. (2000). The influence of an historically oriented course on students' content knowledge in optics evaluated by means of facets-schemes analysis. *American Journal of Physics*, 68(S1), S3–S15.
- C** (b) Galili, I., Hazan, A. (2001). The effect of a history-based course in optics on students' views about science. *Science & Education*, 10(1–2), 7–32.
- D** Solbes, J., Traver, M. (2003). Against a negative image of science: History of science and the teaching of physics and chemistry. *Science & Education*, 12(7), 703–717.
- E** Seker, H., Welch, L. C. (2006). The use of history of mechanics in teaching motion and force units. *Science & Education*, 15(1), 55–89.
- F** Klopfer, L. E., Cooley, W. W. (1963). The history of science cases for high schools in the development of student understanding of science and scientists: A report on the HOSC instruction project. *Journal of Research in Science Teaching*, 1(1), 33–47.

- G** Pocovi, M. C. (2007). The effects of a history-based instructional material on the students' understanding of field lines. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(1), 107-132.
- H** Ogunniyi, M. B. (1987). Conceptions of traditional cosmological ideas among literate and nonliterate nigerians. *Journal of Research in Science Teaching*, 24(2), 107-117.
- I** Hosson, C., Kaminski, W. (2007). Historical controversy as an educational tool: Evaluating elements of a teaching-learning sequence conducted with the text "dialogue on the ways that vision operates". *International Journal of Science Education*, 29(5), 617-642.
- J** Nott, M. (1994). Teaching physics and the nature of science together: A case study. *Physics Education*, 29(3), 170-176.
- K** Dedes, C., Ravanis, K. (2009). Teaching image formation by extended light sources: The use of a model derived from the history of science. *Research in Science Education*, 39(1), 57-73.

Capítulo 3

Uma Revisão Histórica sobre a Gravitação Universal de Newton

OS CAMINHOS DE NEWTON PARA A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL: UMA REVISÃO DO DEBATE HISTORIOGRÁFICO ENTRE COHEN E WESTFALL⁺*

Elder Sales Teixeira

Departamento de Física – UEFS

Feira de Santana – BA

Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, UFBA – UEFS

Luiz O. Q. Peduzzi

Departamento de Física – UFSC

Florianópolis – SC

Olival Freire Jr.

Instituto de Física – UFBA

Salvador – BA

Resumo

Este trabalho tem como objetivos apresentar uma revisão delimitada sobre os caminhos científicos trilhados por Newton até este chegar à sua lei da Gravitação Universal (GU), a partir das análises feitas por I. Bernard Cohen e Richard S. Westfall, estabelecendo um contraste entre as interpretações desses dois historiadores; e discutir possíveis contribuições que esta revisão pode trazer para o ensino do tópico GU orientado pela História e Filosofia da Ciência (HFC).

Palavras-chave: *Gravitação Universal; História da Ciência; Ensino de Física.*

⁺ Newton's paths to the Universal Gravitation: a review of the Historygraphic debate between Cohen and Westfall

^{*} *Recebido: dezembro de 2009.*

Aceito: maio de 2010.

Abstract

This work aims to show a delimited review on the scientific path performed by Newton until to get his law of Universal Gravitation (UG). The review was carried out from the analyses made by I. Bernard Cohen and Richard S. Westfall about this matter, contrasting the interpretations of these historians. Possible contributions from this review to the teaching of UG, guided by History and Philosophy of Science (HPS), are discussed.

Keywords: *Universal Gravitation; History of Science; Physics Teaching.*

I. Introdução

A Gravitação Universal (GU) de Newton é um assunto que, por si só, é de grande interesse para aqueles que se dedicam ao estudo da Física em função da riqueza conceitual que carrega consigo tanto em relação às ideias físicas acerca de força, movimento e princípios de conservação, quanto da linguagem matemática empregada em tais conceitos, quanto também das próprias ideias astronômicas. Ao tratar da sua história, então, o interesse tende a aumentar, por trazer à tona debates conceituais que repercutiram para além das academias de ciências da época (séculos XVII e XVIII) e se estenderam à sociedade como um todo, visto que os frutos desses debates conduziram a humanidade a uma nova visão de mundo. Apesar disso, ainda parece ser um tema pouco valorizado tanto nas salas de aula quanto nos livros didáticos de Física, sobretudo, quando se trata de integrar ao seu ensino, a sua história.

Muitas controvérsias ainda se fazem presentes nos tempos atuais sobre quais foram os caminhos que Newton trilhou desde as suas primeiras investidas nos assuntos da Mecânica, em particular referente à dinâmica planetária, até a escrita do *Principia*, quando praticamente completou tais assuntos. Esses caminhos foram construídos com uso de instrumentos tanto típicos do fazer científico, quanto de natureza externa a este. Fazer, portanto, uma reconstrução de tais caminhos não é tarefa simples nem fácil, sobretudo, porque o próprio Newton, ao que parece, com a preocupação excessiva de firmar indelevelmente algumas das suas pegadas, resultou por apagá-las ou, ao menos, deformá-las. Conforme as palavras de A. Rupert Hall, ao analisar algumas cartas de Newton que tratavam do cálculo da força central e que resultou mais em obscurecimento do que em conclu-

sões precisas sobre a época em que ele estabeleceu sua concepção de GU, “Newton, certamente fez pouco para facilitar o trabalho dos historiadores” (HALL, 1957, p. 71).

Entretanto, muitos historiadores se dedicaram a esta tarefa e, dentre eles, destacaram-se I. Bernard Cohen (1914-2003) e Richard S. Westfall (1924-1996), que se especializaram nos estudos newtonianos e, apesar de concordarem em alguns pontos, apresentaram interpretações muito distintas em suas reconstruções. A proposta do presente trabalho é, a partir de determinados recortes, fazer uma revisão desse debate historiográfico, apresentando as reconstruções feitas por esses dois importantes historiadores sobre os passos científicos realizados por Newton até chegar à GU, sempre buscando estabelecer um contraste entre as suas respectivas interpretações; e, ainda, discutir possíveis implicações desse debate para o ensino da GU de Newton.

No que diz respeito à delimitação do trabalho, serão tratados os estágios de desenvolvimento do pensamento de Newton sobre a mecânica celeste somente nos quatro momentos mais significativos nos quais ele tratou desse tema, a saber: os *anni mirabili*¹, a correspondência com Hooke, o tratado *De Motu* e o tão celebrado *Principia*. Outro recorte é que o trabalho irá se ater somente ao papel dos conceitos de força em Newton para chegar à GU, sempre contrastando as visões de Cohen e Westfall, adicionando eventuais contribuições de outros historiadores quando for pertinente. Portanto, não se discutirá o papel das concepções de éter de Newton para o seu trabalho sobre a GU², nem a influência de aspectos extra científicos como alquimia, teologia, etc. (WESTFALL, 1995; DOBBS, 1974; RATTANSI, 1988) e nem o problema referente às considerações de Newton sobre os corpos massivos e as massas pontuais. Seguramente, todos esses fatores foram relevantes para que Newton pudesse construir a sua GU, entretanto, por razões de monta e de aprofundamento que cada um de tais fatores requisitaria, optou-se, aqui, por enfocar somente os conceitos de força, cujo interesse, por sua vez, dispensa maiores justificativas.

¹ Assim ficou conhecido o período correspondente aos dois anos (1665-1666) em que Newton se recolheu à sua residência rural em Woolsthorpe, como é bem conhecido, em função da assolação da peste e consequente fechamento provisório de Cambridge. O próprio Newton viria a se referir mais tarde a esse período como o mais profícuo de sua carreira.

² Abrantes (1998) discute três diferentes concepções de éter que Newton apresentou, respectivamente, em três diferentes momentos de seu trabalho científico.

Ao final, serão discutidas algumas possíveis contribuições que uma revisão desta natureza pode trazer para o ensino da GU de Newton, no que diz respeito a proporcionar um maior amadurecimento dos estudantes de graduação (especialmente os de licenciatura em física) quanto aos vários aspectos sobre a natureza da ciência e imagem dos cientistas, bem como, no que diz respeito a propiciar uma melhor compreensão conceitual e capacidade de argumentação desses estudantes sobre o referido tema.

II. Durante os *Anni Mirabili*

Segundo Cohen (1983) existem duas ideias que, embora equivocadas, são muito difundidas na literatura sobre o percurso geral que conduziu Newton à GU: uma delas afirma que Newton teria desenvolvido a lei da GU quase que por completo durante os *anni mirabili* (1665, 1666), embora viesse a publicá-la somente em 1687 no *Principia*³; a outra sustenta que a lei da GU foi deduzida por Newton diretamente das leis de Kepler (como exemplo, tais ideias podem ser encontradas em Lucie, 1975 e Nussenzveig, 1981). Essa última é de particular importância para o ensino, visto que tal dedução é frequentemente replicada nos livros didáticos de Física. Cohen (1983) apresenta vários argumentos para mostrar a falsidade dessas ideias afirmando que Newton abandonou seus estudos sobre mecânica logo após os *anni mirabili* sem possuir nesse período o instrumental intelectual necessário e suficiente para desenvolver a lei da GU (conforme apresentada no *Principia*) e somente retornou a esses estudos muito tempo depois, quando desenvolveu as condições intelectuais para isso.

A contestação de Cohen à primeira ideia é fundamentada na concepção de que, durante os *anni mirabili*, Newton considerava a dinâmica orbital dos planetas em termos de uma combinação – que não era muito clara – da ideia de tendência centrífuga cartesiana com a ideia de gravidade solar. De acordo com a concepção mecanicista de Descartes, aceita de forma ortodoxa naquela época, um

³ A questão de por que Newton teria levado tanto tempo para publicar um conhecimento que teria concebido quase vinte anos antes foi posta por Florian Cajori em seu “Newton’s Twenty Years’ Delay in Announcing the Law of Gravitation” (in Sir Isaac Newton, 1727-1927: A bicentenary evaluation of his Work (BALTIMORE, 1928), 127-88). O argumento de Cajori, conforme cita Whiteside (1970), é que “a demora de Newton foi devido a dificuldades teóricas envolvidas no teste da Terra-Lua”. (CAJORI, *apud* WHITESIDE, 1970, p.15, nota 3). As posições de Cohen e Westfall sobre essa questão serão discutidas mais adiante.

planeta era mantido em órbita estável em torno do Sol por ser constantemente desviado da sua tendência de sair em linha reta tangente à órbita, ou seja, da sua tendência centrífuga. Esse constante desvio era devido à matéria do espaço, imediatamente superior à órbita do planeta, que girava em vórtices e que, por ser dotado de maior tendência centrífuga que o planeta, o retinha em sua trajetória orbital. Em conformidade com a concepção cartesiana de universo pleno (que não admitia o vazio) e constituído de matéria e movimento, a tendência centrífuga de um planeta podia ser mensurada pelo produto da sua extensão (volume) com sua velocidade e, até uma certa região limítrofe do espaço celeste, quanto mais afastado do Sol o planeta estivesse, maior seria a sua tendência centrífuga⁴ (PEDUZZI, 2008).

Newton, embora desde os seus anos de estudante em Cambridge já manifestasse ruptura com muitas ideias cartesianas, ainda estava influenciado por esta concepção de tendência centrífuga como mecanismo de manutenção da órbita planetária. Entretanto, havia ainda uma insatisfação que pairava no meio intelectual da época quanto à estabilidade das órbitas planetárias considerando apenas a tendência centrífuga. Uma explicação alternativa bastante aceita era a de que havia dois tipos de ‘força’ equilibrando o planeta em sua órbita: a tendência centrífuga, devido ao seu movimento orbital, e a gravidade solar, uma espécie de ‘ação’ sobre o planeta devido ao Sol (COHEN, 1983; PEDUZZI, 2008). Ou seja, para equilibrar a tendência centrífuga, deveria haver algum tipo de ‘ação’ do Sol sobre o planeta – que não estava claramente explicado na época – da mesma maneira que a Terra ‘agia’ sobre os corpos ao seu redor, mantendo-os em sua superfície.

Um dos argumentos que alimenta a versão de que Newton desenvolveu a GU durante os *anni mirabili* se apoia numa nota biográfica escrita nos últimos anos de sua vida, na qual ele afirmou ter concebido, durante os *anni mirabili*, a ideia de que a gravidade da Terra se estendia até a Lua. Provavelmente, Newton fizera esta afirmativa por estar envolvido em muitas disputas de prioridade, inclusive quanto à autoria da lei de força $1/R^2$ (COHEN, 1983; WESTFALL, 1995). Contudo, mesmo que ele concebesse na década de 1660 tal ideia, isso não significava que compreendia a verdadeira natureza da força gravitacional, visto que sua

⁴ Essa ideia de tendência centrífuga difere do conceito atualmente aceito de força centrífuga. Esta última se refere à força de inércia que é dirigida radialmente para fora do centro de um movimento de rotação e que só existe no referencial em rotação (NUSSENZVEIG, 1981).

concepção de gravidade solar – que para ele era constante – se dava conforme descrito acima e não como veio a estabelecer mais tarde.

Portanto, durante os *anni mirabili*, Newton era adepto de uma concepção sobre a dinâmica orbital baseada na ideia de equilíbrio entre tendência centrífuga e gravidade solar e não compreendia ainda a gravidade no sentido em que veio a empregar mais tarde no *Principia*, a saber, de uma força gravitacional de ação a distância exercida pelo Sol sobre o planeta, o que destitui de crédito a concepção de que teria desenvolvido sua GU naquele período.

Para contestar a segunda ideia, um dos argumentos apontados por Cohen (1983) se refere à falta de credibilidade das leis de Kepler no meio ‘científico’ antes dos anos 1679/1680, período em que ocorreu a importante correspondência entre Newton e Hooke. Conforme Cohen (1983), Kepler teria obtido a sua primeira lei⁵ a partir unicamente dos dados da órbita de Marte e, então, conjecturou a sua validade para as demais órbitas. Portanto, trata-se de um procedimento indutivo a partir de uma única fonte de dados, o que, mesmo naquele período, seria considerado pouco confiável. Além disso, essa lei encontrou concorrência como, por exemplo, as órbitas ovais sugeridas por Cassini⁶, que se opunham às órbitas elípticas keplerianas.

Para Cohen (1983), uma evidência da falta de credibilidade das leis de Kepler no período anterior aos anos 1679/1680 era a ausência da segunda lei⁷ nos livros de astronomia da época. Como exemplo, cita uma obra de 1673⁸, escrita por Jeremiah Horrox, um discípulo de Kepler, que continha cerca de 500 páginas dedicadas à defesa da astronomia kepleriana e, no entanto, sequer citava explici-

⁵ Essa lei (conhecida hoje como a primeira lei de Kepler) afirma que as órbitas planetárias em torno do Sol são elípticas e que o Sol situa-se em um dos focos da elipse formada pela órbita.

⁶ Esse nome é devido ao matemático e astrônomo ítalo-francês Giovanni Domenico Cassini (1625-1712), que estudou essas curvas no ano de 1680. As ovais de Cassini correspondem às curvas hoje conhecidas como Lemniscata. A principal diferença entre os dois modelos é que nas ovais de Cassini o produto entre as distâncias dos focos ao ponto da órbita em que se encontra o planeta é constante, ao passo que na elipse a soma dessas distâncias é constante.

⁷ A segunda lei de Kepler (a lei das áreas) afirma que o raio vetor que une o Sol a um planeta varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais.

⁸ HORROX, J. Opera posthuma; viz. **Astronomia Kepleriana, Defensa & Promota...** Londres: typis Gulielmi Godbid, impensis J. Martin, 1673.

tamente a segunda lei de Kepler. Além disso, assim como ocorreu com a primeira lei, a segunda também se defrontou com explicações alternativas na época, a exemplo da lei das áreas de Thomas Streete (ver COHEN, 1983, p. 248).

Derek Whiteside também concorda que ao menos as duas primeiras leis de Kepler não eram bem aceitas na época. Entretanto, em relação à terceira lei, ele afirma que “no intervalo de 1609 a 1687 apenas a terceira hipótese de Kepler esteve próxima de uma generalizada aceitação por seus contemporâneos”. (WHITESIDE, 1964, p. 121). Neste sentido, Wilson (1970) é ainda mais enfático acenando que a “*exatidão*” da terceira lei de Kepler já havia sido estabelecida por Streete na sua *Astronomia Carolina* de 1661, que era conhecida por Newton.

Havia ainda um problema com respeito à segunda lei de Kepler, que ficou conhecido como “o problema de Kepler”:

O uso da lei das áreas para determinar a posição futura de um planeta depende da solução quam proxime de um problema geométrico que carece de solução exata, qual seja, dados os pontos P_0 e P_1 de uma elipse, determinar o ponto P_2 , tal que as áreas dos setores focais associados (P_0SP_1 e P_1SP_2) se encontrem em uma razão dada, a saber (segundo a lei das áreas de Kepler), a dos tempos de trânsito de P_0 a P_1 e de P_1 a P_2 . O Sol se encontra no foco S da elipse (COHEN, 1983, p. 250).

Christopher Wren, em 1659, publicou um ensaio com uma solução do problema de Kepler que foi usada por Newton somente no *Principia*, quando já tinha consciência do papel da lei das áreas na dinâmica orbital (COHEN, 1983).

Outro argumento de natureza lógica que desacredita a ideia de adoção das leis de Kepler por Newton durante os *anni mirabili* para deduzir a lei da GU diz respeito à incompatibilidade da terceira lei de Kepler⁹ com a GU de Newton (COHEN 1988). A terceira lei de Kepler é válida para um sistema de corpos orbitando em torno de um ponto central, não considerando a atração mútua entre dois corpos (Sol e planeta) e nem as atrações entre muitos corpos (os planetas entre si). Entretanto, o sistema planetário para Newton era um sistema de muitos corpos (os planetas e o Sol) que interagem entre si em torno de um centro de gravidade não fixo. Em tal sistema, a terceira lei de Kepler não seria válida. Somente fazendo aproximações, tais como considerar as massas dos planetas desprezíveis quando comparadas com a do Sol e desprezar as interações mútuas

⁹ A terceira lei de Kepler afirma que a razão T^2/R^3 é constante, sendo T o período orbital de um planeta e R a distância média do planeta ao Sol.

entre os planetas, poder-se-ia compatibilizar a terceira lei de Kepler com o sistema newtoniano. Cohen (1988) mostra que Newton somente viria a se dar conta desse problema e fazer tais aproximações após uma revisão do seu tratado *De Motu* em 1684 e não antes disso.

Portanto, as leis de Kepler se encontravam numa situação ‘insegura’ durante os *anni mirabili*, logo, seria demasiado arriscado para Newton naquele período erguer sua mecânica planetária alicerçada em tais leis. Newton somente viria a fazer uso das leis de Kepler quando passou a tomar consciência do significado físico das mesmas e quando mudou suas ideias sobre a dinâmica orbital, o que somente viria a acontecer após a troca de correspondência com Hooke, conforme os argumentos de Cohen (1983).

Quanto às interpretações de Westfall sobre a situação da mecânica de Newton durante os *anni mirabili*, não parece haver muitas discordâncias em relação a Cohen sob vários dos aspectos acima abordados. Para Westfall (1995) a interpretação que supervaloriza os *anni mirabili* criou uma espécie de mito sobre a genialidade de Newton associada à ideia de “insight”, o mito de um homem que, iluminado pelo dom da sabedoria, pôde realizar tamanha produtividade em tão pouco tempo. Westfall critica esta interpretação e argumenta que mais importante do que superdimensionar esses dois anos é reconhecer os fatores mais significativos para elaboração das grandes obras de Newton: a sua dedicação exclusiva aos estudos, propiciada pelo seu isolamento social; e a continuidade desses estudos, visto que sua independência intelectual (autodidatismo) em relação à Cambridge já havia se configurado antes daqueles anos, quando Newton ainda era estudante, e somente muito tempo depois é que pôde se instrumentalizar conceitualmente para produzir tais obras. Whiteside (1970) acentua que, em sua época de estudante, Newton não tinha nem colegas suficientemente interessados, e nem tutores suficientemente conhecedores, em assuntos da ciência moderna para servir como seus interlocutores, e as evidências oriundas dos manuscritos que sobreviveram daquela época apontam para um Newton singularmente autodidata.

Westfall (1971), entretanto, argumenta pela necessidade de apoio adicional em muitos manuscritos não publicados de Newton para fazer uma análise mais minuciosa. Para Westfall (1971), quando Newton se dedicou a escrever o tratado *De Motu* (de 1684), após um bom período sem tratar de mecânica, as suas concepções acerca de força e movimento estavam no mesmo patamar em que se encontravam durante a década de 1660, quando havia escrito *De Gravitatione* e *Waste*

¹⁰ *Book*. Dentre essas concepções aparecem vários conceitos de força, os quais acarretam dificuldades que ele não consegue resolver antes do *Principia*; não considerava o princípio de inércia, adotando a ideia de força inerente (uma força interna ao corpo que é responsável pela manutenção do seu movimento de translação uniforme); considerava a gravidade constante e a ideia de equilíbrio entre tendência centrífuga e gravidade solar, nos termos já comentados acima.

Westfall (1971) afirma que, somente a partir das revisões que Newton faz do seu tratado *De Motu* – o que acontece entre 1685 e 1686 –, é que ocorrem importantes mudanças de pensamento que o levam a aderir em definitivo ao princípio de inércia e à ideia de uma força central como fundamentais para explicar a dinâmica orbital. Neste ponto, aparece uma notável discordância entre os dois historiadores em questão, visto que, para Cohen (1983; 1988), as transformações importantes no pensamento de Newton que o conduziram à GU ocorreram entre 1679 e 1680, quando da correspondência com Hooke, conforme será discutido mais adiante.

De acordo com Cohen (1983), desde os *anni mirabili* até os anos de 1679/1680, aproximadamente 15 anos se passaram sem que Newton produzisse algo de substancial sobre mecânica. Os relatos de Whiston e Pemberton¹¹ citados por Cohen (1983) e também discutidos por Wilson (1970) podem justificar o abandono de Newton por tanto tempo nos assuntos da mecânica. Segundo tais relatos, Newton haveria feito em 1666 alguns cálculos na tentativa de encontrar acordo entre a ‘potência’ na órbita da Lua (um tipo de ‘ação’ da Terra sobre a Lua devido à suposta extensão da sua ‘gravidade’ até a órbita lunar) e a gravidade

¹⁰ *De Gravitatione* era um tratado sobre mecânica dos fluidos, mas que continha discussões sobre os conceitos de espaço, movimento e matéria em que Newton se contrapunha claramente a algumas visões de Descartes. O ano provável em que foi escrito é 1668 e marca, segundo Westfall (1971), o último momento em que Newton trata de mecânica de maneira substancial até o ano de 1684. *Waste Book* era um caderno de anotações que Newton herdou de seu padrasto quando ainda era estudante em Cambridge e no qual fazia notas sobre diversos assuntos. Dentre elas, haviam as famosas ‘*Questiones*’, que marcam o início da sua ruptura com a filosofia cartesiana vigente, bem como a sua independência intelectual em relação à Cambridge.

¹¹ William Whiston (1667-1752) foi o sucessor de Newton como professor Lucasiano em Cambridge. Em 1749 relatou em suas memórias, conforme ouvira do próprio Newton, como este teria descoberto a teoria da gravidade. Henry Pemberton (1694-1771), físico e matemático, conhecedor de Newton, publicou em 1728 um livro sobre a filosofia deste, no qual incluiu o relato sobre os cálculos frustrados que levaram Newton a abandonar o tema (as citações explícitas de tais relatos estão em Cohen, 1983, p. 257).

local terrestre. Entretanto, em função dos resultados negativos desses cálculos – não encontrou tal acordo neste ‘teste da Lua’ – Newton teria se frustrado, o que o fez se voltar para outros assuntos e não mais se pronunciar sobre mecânica durante todo aquele tempo.

Já para Westfall (1971), essa ausência se prolongou por cerca de 20 anos, visto que, para esse autor, a correspondência com Hooke não representou uma retomada dos estudos em mecânica e sim apenas um momento em que Newton se manifestou sobre o assunto, porém sem contribuição importante para compreender o estágio de seu pensamento sobre o tema. Igualmente sem relevância quanto a esse aspecto, há ainda outros dois momentos em que Newton se manifestou sobre mecânica antes de 1684: um manuscrito não publicado de data controversa (1669 ou 1673)¹², no qual tratou das oscilações do pêndulo em um cicloide; e a correspondência com Flamsteed, entre 1680 e 1681, em que Newton criticou a dinâmica que aquele usou para justificar a aparição de um cometa (WESTFALL, 1971).

Um argumento diferente é encontrado em Whiteside (1970). Ele afirma que a falta de conhecimento por parte de Newton da segunda lei de Kepler ou, pelo menos, a falta de uma adequada compreensão acerca do seu caráter geral, foi a principal razão para justificar essa demora de cerca de vinte anos de Newton para compor o *Principia*. Já Cushing (1982) argumenta que:

imprecisões no valor conhecido da distância Terra-Lua e o problema da força atrativa gerada por uma esfera eram provavelmente dificuldades menos sérias do que a falta de uma estrutura dinâmica exata para fazer, dentro da qual, os necessários cálculos das órbitas. Newton parece não ter plenamente e precisamente formulado sua dinâmica até a década de 1680 (CUSHING, 1982, p. 620).

¹² Há duas possíveis datas para a escrita desse manuscrito: a primeira (1669) é devido a uma visita que David Gregory (um professor de matemática escocês) fez a Newton em 1694, e declarou ter visto o citado artigo datado de 1669. Entretanto, em função das disputas de Newton quanto à prioridade da lei de força $1/R^2$ (que constava no artigo), é possível que ele tenha adulterado propositadamente essa data; a segunda (1673) é oriunda de uma carta de Newton a Henry Oldenburg (secretário da *Royal Society* na época) mostrando que, em 1673, Newton conhecia o “*Horologium Oscillatorium*” de Huygens, publicado nesse mesmo ano e, assim, estimulado por essa publicação, teria logo escrito o referido artigo. Westfall (1971) defende a segunda versão.

III. A Correspondência com Hooke

No final de 1679, Hooke, recém nomeado secretário da Royal Society, escreveu a Newton solicitando-lhe atualizar sua correspondência com a instituição, interrompida após a morte de Oldenburg em 1677. Na ocasião, apresentou a Newton sua hipótese de que o movimento orbital de um planeta ocorria conforme a combinação de um movimento tangencial à órbita e uma atração em direção ao Sol segundo a lei $1/R^2$ (WESTFALL, 1971; COHEN, 1988; PEDUZZI, 2008), uma ideia que representava uma novidade na época, destoando da concepção vigente. Daí, iniciou-se a famosa troca de cartas que viria a ganhar destaque nessa história.

Segundo a reconstrução feita por Westfall (1971), Newton, em uma primeira resposta, não se reportou diretamente à hipótese levantada por Hooke, mas propôs uma demonstração de que a Terra gira em torno do seu próprio eixo. Supôs que a trajetória da queda de um corpo solto de uma torre é ligeiramente deslocada para leste e teria um movimento em espiral da superfície para o centro da Terra (Fig. 1a). Hooke, sustentando sua hipótese de que o movimento era composto de uma força em direção ao centro e uma componente tangencial à superfície, respondeu a Newton que tal movimento seria semelhante a uma elipse (Fig. 1b). A discussão durante a troca de cartas se voltou para o movimento orbital e Hooke sustentava sua ideia de que a órbita era elíptica, fechada e mantida pela combinação de uma força central com a componente tangencial, continuamente desviada pela primeira, considerando a gravidade variável com o inverso do quadrado da distância. Newton, por sua vez, era ainda adepto da ideia de equilíbrio entre força centrífuga e gravidade, que considerava constante, e propôs outro modelo que levaria o corpo de A, passando por F, G, H, I, K e retornando até A (Fig. 1c), num movimento alternado de ascensão e descenso em que força centrífuga e gravidade se contrabalanceavam. Conforme Dias (2006), esse modelo era uma correção de Newton ao seu modelo anterior e foi elaborado sob influência da teoria planetária de Borelli¹³.

¹³ Newton estudou o livro “Especulações sobre os Satélites Mediceanos Deduzidos de Causas Físicas” de Giovanni-Alfonso Borelli que propôs uma explicação qualitativa sobre o movimento orbital das luas em torno de Júpiter em termos de uma composição da gravidade e da força centrífuga (WHITESIDE, 1970; DIAS, 2006). Essa leitura supostamente inspirou Newton para compor seu modelo.



Fig. 1a

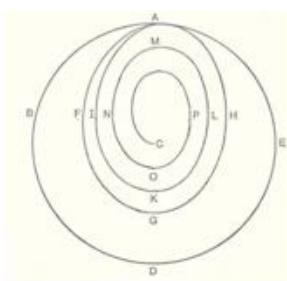


Fig. 1b

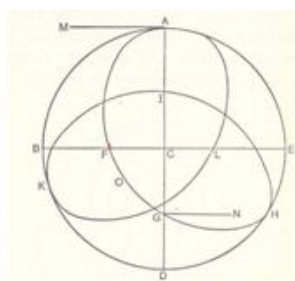


Fig. 1c

Figuras extraídas de Westfall (1971).

Assim, aparentemente, trata-se de uma discussão cinemática entre os dois personagens sobre a trajetória de um corpo em torno de um ponto, mas o pano de fundo e, portanto, a divergência que está por detrás dessa discussão, parece dizer respeito à dinâmica planetária. No fundo, aqui aparece um conflito entre dois modelos dinâmicos diferentes tentando uma solução para o problema do movimento orbital dos planetas. E, nesse ponto, o modelo de Hooke era bem melhor que o de Newton, pois continha a semente da ideia de força central que somente mais adiante foi assimilado por Newton e que o permitiu, em conjunção com o tratamento matemático adequado, dar um passo decisivo para a GU. Em grande medida, Newton deve isso a Hooke (COHEN, 1983; WESTFALL, 1971).

Vale chamar a atenção para outra sutil distinção entre Cohen e Westfall que diz respeito à dívida de Newton para com Hooke. Os dois historiadores concordam quanto ao fato de que essa dívida reside muito mais na ideia de força central e da componente inercial (tangente à órbita) do que na lei de força $1/R^2$, que Hooke tanto reivindicou. Isso porque, embora este tivesse apresentado a lei pela primeira vez a Newton, não tinha conhecimentos matemáticos o suficiente para saber deduzir suas consequências. Newton, por sua vez, se não a conhecesse de Hooke seguramente a conheceria de outro, pois a lei seria facilmente deduzida da expressão da força centrífuga de Huygens já conhecida por todos, além de ser o matemático mais capaz da época para saber extrair os resultados da lei. Por outro lado, a nova hipótese formulada por Hooke, até então por ninguém conjecturada, foi a grande contribuição que este legou para a mudança de concepção de Newton, (COHEN, 1988; WESTFALL, 1971; PEDUZZI, 2008). Entretanto, a sutil diferença entre as interpretações de Cohen e Westfall, nesse caso, reside na valoração dessa dívida. Enquanto que o primeiro enfatiza a importância do trabalho mate-

mático de Newton, pois sem as habilidades deste de nada serviria a conjectura de Hooke, em suas palavras, “A ciência não progride por conjecturas, senão por demonstrações” (COHEN, 1983, p. 272); o outro valoriza mais o papel da hipótese de Hooke na mudança conceitual de Newton, pois “estabeleceu os elementos mecânicos do movimento orbital em termos adequados ao conceito de inércia” permitindo colocar ‘de pé’ uma dinâmica orbital apropriada e acentua ainda que “nesta matéria Hooke foi o mentor de Newton” (WESTFALL, 1971: 427).

Westfall (1971) considera, portanto, que a mecânica orbital de Hooke era muito mais clara do que a de Newton, eliminava a ideia vigente de tendência centrífuga, trazia embutido o conceito de inércia, considerava o movimento orbital como uma elipse e que a gravidade variava com o inverso do quadrado da distância. Ao final da correspondência, Newton – a despeito de considerar a gravidade constante – acabou acatando momentaneamente essa ideia de Hooke de uma força externa mudando a direção do movimento. Daí, Newton aplicou seu próprio conceito de força externa (força de impulso), concebida inicialmente para resolver problemas de impacto entre corpos, na resolução do problema do movimento orbital. Ele compreendia essa força como atuando discretamente sobre o corpo, alterando a cada ponto a direção do movimento orbital sendo que a ‘força total’ (referente à mudança total de movimento) durante um intervalo de tempo seria dada pela soma dessas forças impulsivas discretas durante o mesmo intervalo de tempo. Em um artigo não publicado de 1679¹⁴, Newton demonstrou matematicamente a conjectura de Hooke de que na elipse, obedecendo-se à lei das áreas, a força é do tipo $1/R^2$. Ele incluiu nesse artigo a ‘Hipótese I’, que é uma replicação do princípio de inércia extraído de Hooke.

Entretanto, o argumento de Westfall é que se trata de uma adesão efêmera a tais ideias de Hooke e, portanto, não representa uma transformação no pensamento de Newton sobre o problema em questão. Nas palavras do próprio Westfall:

Sendo que a última consideração explícita de Newton sobre o movimento em De Gravitatione abandonou a inércia com a relatividade Cartesiana, e sendo que De Motu, composto em 1684, começou a partir da posição do

¹⁴ Consta que durante a famosa visita de Halley a Newton em 1684, na qual Halley o consulta sobre o problema da dinâmica planetária (que ficou conhecido como ‘o problema de Halley’), Newton teria afirmado que já havia resolvido (justamente no referido artigo não publicado de 1679). Entretanto, na ocasião da visita, escondeu o tal artigo de Halley por medida de cautela, prometendo enviar a solução posteriormente.

De Gravitatione, a Hipótese I põe algo de misterioso na história da mecânica newtoniana. A mim parece que Newton meramente adotou as premissas que Hooke estabeleceu (WESTFALL, 1971, p. 429).

Whiteside (1970), no mesmo sentido, afirma de forma ainda mais contundente que antes do *De Motu* não havia qualquer referência explícita ou mesmo implicada à força centrípeta como causa do movimento orbital e nem mesmo qualquer evidência factual do suposto ‘teste da Lua’ e que “nós somos, eu penso, inelutavelmente atraídos para identificar 1684 como o verdadeiro *annus mirabilis* nos quais os princípios básicos do Principia – e em consequência da dinâmica clássica – foram pela primeira vez claramente concebidos” (WHITESIDE, 1970, 14).

Em contraposição, Cohen (1983) supervaloriza o papel da correspondência com Hooke nas mudanças de pensamento que ocorreram em Newton nesse período e que o conduziram à GU. Foi a partir dessa discussão com Hooke que Newton passou a compreender o significado físico das leis de Kepler, transformando-as “de simples regras cinemáticas ou descritivas a princípios dinâmicos ou causais” (COHEN, 1983, 272). Como exemplo, a lei das áreas para Newton era uma simples lei geométrica e não fazia parte das suas ideias astronômicas antes desse período (1679/80); passou da ideia de tendência centrífuga para a concepção de força centrípeta; mudou sua concepção mecanicista da natureza passando de uma visão de matéria inerte para uma concepção de matéria ‘ativa’, com capacidade de atração e repulsão. Só para ilustrar, a ideia de tendência centrífuga estava associada à de matéria inerte, enquanto que a ideia de força centrípeta estava associada à de ação de um corpo sobre o outro. Seguindo uma linha de pensamento similar, Wilson (1970) afirma que foi justamente devido à correspondência com Hooke que Newton se deparou, pela primeira vez, com a noção de gravitação universal¹⁵ baseada na lei do inverso do quadrado.

Vale ressaltar, ainda, que Cohen interpreta a atitude de Newton nesse período como adotando uma postura instrumentalista em relação ao seu conceito de força. “A chave do pensamento criativo de Newton em mecânica celeste não foi considerar que as forças fossem propriedades reais (...), mas que pudesse examinar as condições e propriedades de tais forças como se fossem reais” (COHEN, 1983, p. 276). Para ele, Newton não considerava a força como uma propriedade

¹⁵ O termo *universal*, empregado nesse ponto por Wilson (1970), limita-se à extensão entre Sol e planetas.

intrínseca do corpo, adotando uma postura em que podia considerar as forças de forma a tratá-las matematicamente para resolver os problemas do mundo real.

Aqui aparece outra divergência entre os dois historiadores, pois Westfall considera que às propriedades reais da matéria, que conforme o mecanicismo cartesiano (vigente na época) consistia de extensão e movimento, Newton adicionou o conceito de força (atração e repulsão), propondo assim “uma adição à ontologia da natureza” e assumindo uma postura realista, “ele tratou forças como entidades que realmente existem” (WESTFALL, 1971, p. 377).

IV. Sobre o tratado *De Motu*

Westfall subvaloriza, portanto, o impacto da correspondência com Hooke na transformação de pensamento de Newton e sustenta que essa transformação somente viria a ocorrer de fato a partir de 1684 quando, movido por um estímulo externo, a saber, a famosa visita de Halley em agosto do mesmo ano, ele retomou os seus estudos sobre mecânica desde o estágio em que se encontrava na década de 1660, ou seja, a partir dos manuscritos *De Gravitatione* e *Waste Book*. Conforme prometera a Halley, Newton enviou no mesmo ano uma primeira versão do tratado *De Motu*, cuja dinâmica era menos satisfatória que a do artigo de 1679, além de internamente inconsistente e inadequada para sustentar as demonstrações, visto que se tratava de um retorno às suas concepções da década de 1660 (WESTFALL, 1971).

Há três versões do *De Motu*, sendo que a terceira passou por duas revisões ao longo de 1685-1686. Essas revisões contêm as principais mudanças conceituais que conduziram Newton à GU e podem ser consideradas como esboços do *Principia* (WESTFALL, 1971). Nas revisões, Newton empregou, pela primeira vez, o termo ‘força centrípeta’, o que é simbolicamente significativo, pois, ao se opor à ideia de ‘força centrífuga’ (termo cunhado por Huygens), o termo ‘força centrípeta’ simbolizou uma importante mudança conceitual para a compreensão do movimento orbital. Essa mudança conceitual abriu as portas para a dinâmica moderna, pois mostrou que o movimento orbital tem a mesma natureza de um movimento retilíneo acelerado (são cinematicamente diferentes, mas dinamicamente equivalentes). “Dado o conceito de inércia retilínea, o movimento circular é possível apenas quando uma força desvia continuamente um corpo de sua trajetória retilínea” (WESTFALL, 1971, p. 432).

Contudo, o conceito de inércia não aparecia na primeira versão do *De Motu*. Em outras palavras, a Hipótese I do artigo de 1679, que era uma forma do princípio de inércia, não constava nessa primeira versão do *De Motu*. Em con-

trapartida, havia uma definição de movimento retilíneo e uniforme mantido por uma ‘força inerente’ (*vis insita*), uma força interna ao corpo que o fazia perseverar naquele movimento, indicando algo de essencial nesse movimento além de uma ‘mera translação’. Essa ideia já estava presente em *De Gravitatione* e só foi abandonada após as revisões do *De Motu*, daí o argumento de Westfall quanto à presença da Hipótese I no artigo de 1679 se tratar apenas de uma mera adesão temporária de Newton à inércia de Hooke e não uma transformação na sua forma de pensar.

Na primeira versão do *De Motu* havia duas definições e duas hipóteses, o movimento orbital era compreendido como composto de força centrípeta mais a força inerente (tangente à órbita). Depois, Newton inseriu uma terceira definição sobre a resistência de um meio como uma força que impede o movimento uniforme; entretanto não trata dessa força como um fator constituinte no movimento orbital, o que é uma inconsistência. Inseriu ainda uma terceira hipótese e escreveu “Hipótese IV” no cabeçalho de uma página que deixou em branco. Na versão dois, essa página aparece preenchida com o conteúdo da Hipótese, só que escrita com a letra de Halley.

A Hipótese III¹⁶ fala do paralelogramo de forças de Newton (Fig. 2) para duas forças atuando no corpo (inerente e centrífuga). A Hipótese afirma que um corpo sob ação de duas forças ao mesmo tempo (uma na direção de AB e outra na direção de AC) é levado ao mesmo lugar (o ponto D) para o qual seria levado caso fosse submetido sucessivamente a cada uma das forças no mesmo tempo de forma independente. Esse paralelogramo de forças “era uma adaptação do paralelogramo de movimentos de Galileu” (WESTFALL, 1971, p. 435), e trazia outra importante inconsistência: tratava no mesmo plano dois tipos de força incomensuráveis entre si. A força inerente era interna e responsável pela perseverança do movimento retilíneo uniforme, logo seria mensurada por uma expressão do tipo $f = mv$. Já a força centrífuga era externa e responsável por provocar a alteração do movimento retilíneo uniforme, logo seria mensurada por uma expressão do tipo $f = ma$, o que evidencia uma incompatibilidade dimensional.

¹⁶ Essa Hipótese acabou se convertendo no corolário I que sucede as três leis do movimento de Newton que, por sua vez, antecedem o Livro I do *Principia* (ver NEWTON, 2005, p. 460-461).

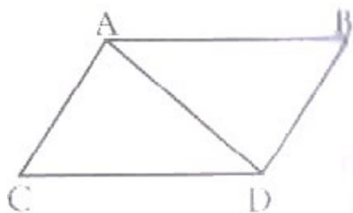


Fig. 2 – Paralelogramo de forças de Newton. Extraída de Newton (2005).

Outra inconsistência que havia na primeira versão do *De Motu* dizia respeito à ausência de uma definição independente de massa, embora afirmasse que a “a força inerente é mensurável por mv ” (WESTFALL, 1971, p. 435). Este problema persistiu em Newton mesmo após o *Principia* e foi uma das críticas apontadas por Ernst Mach em relação à mecânica newtoniana (BASSALO, 1992; WESTFALL, 1971; ASSIS, 1999).

A segunda versão do *De Motu* era uma mera cópia da primeira versão com algumas emendas, mas que em nada contribuíam para resolver as inconsistências presentes na primeira. Diferentemente, a terceira versão apresentava mudanças em relação às outras duas. Newton acrescentou mais hipóteses totalizando cinco e as chamou de leis (que no *Principia* foram reduzidas a três, conhecidas hoje como as ‘leis de Newton’) e incluiu um escólio afirmando a realidade do espaço absoluto¹⁷. Apesar disso, algumas contradições permaneceram: foi introduzido o conceito de inércia para um sistema de corpos girando em torno do seu centro de gravidade; contudo, continuou presente a ideia do movimento mantido por uma força inerente; ainda, apareceu uma lei equivocada para mensurar a resistência de um meio sobre um corpo através do produto conjunto da superfície do corpo pela densidade do meio pela velocidade, essa lei foi suprimida na revisão.

No processo de revisão do *De Motu* é que Newton foi modificando seu conceito de força inerente (deixando de ser um tipo de força com a função de manter o movimento para se tornar um conceito de força de resistência à mudança de estado do corpo) se aproximando do conceito de inércia. Essa mudança levou Newton a ficar sem critério para justificar a translação absoluta, o que o impediu de determinar os movimentos absolutos. “... o conceito de movimento absoluto

¹⁷ Westfall (1971) afirma que Newton, de acordo com a sua cosmovisão, estabeleceu esse conceito de espaço absoluto para se opor ao relativismo cartesiano – no qual, velocidade e direção do movimento não podem ser determinadas em termos absolutos – e assim superar a insegurança trazida pela ideia de um universo sem um referencial seguro, absolutamente fixo.

deixou de ter qualquer função operativa na mecânica de Newton” (WESTFALL, 1971, p. 448).

Dentro desse contexto do momento da revisão do *De Motu* – portanto, pouco antes de Newton escrever o *Principia* – discute-se, a seguir, como Newton, ao abrir mão paulatinamente do conceito de força inerente em adesão ao conceito de inércia, perdeu seu critério operativo para garantir a existência de movimento absoluto.

Segundo o próprio Newton, o movimento absoluto se distingue de um movimento relativo por conta da aplicação de uma força ao corpo que move. O conceito newtoniano de força inerente, uma vez que se tratava de uma força interna ao corpo com a função de mantê-lo em movimento definia, assim, um critério para determinar o movimento absoluto do corpo – sua translação absoluta. Ou seja, estando a força no corpo fica garantido que é este que se move absolutamente. O princípio de inércia, contudo, ao romper com a ideia de força interna ao corpo e ao estabelecer que o mesmo se move por mera translação uniforme, sem a necessidade de uma força aplicada ao corpo, não oferecia tal critério. Apesar disso, Newton manteve o conceito de movimento absoluto em sua mecânica para reafirmar sua posição contra o relativismo cartesiano (WESTFALL, 1971).

Newton discutiu o sistema constituído por dois globos presos entre si por uma corda e girando em torno do centro de gravidade do sistema, localizados em um universo supostamente imenso e vazio. A existência de uma tensão na corda é garantia de movimento em relação ao espaço absoluto. Admitindo, a seguir, que nesse espaço existissem corpos remotos tais como as ‘estrelas fixas’, e havendo movimento relativo entre os globos e as estrelas, não se poderia determinar, apenas a partir do movimento de um em relação ao outro, o verdadeiro movimento desses corpos, caindo-se, portanto, em um relativismo de cunho cartesiano. Contudo, ao se identificar uma tensão na corda, pode-se assegurar que são os globos que estão em movimento absoluto e não as ‘estrelas fixas’. Portanto, a existência de força nos corpos, segundo Newton, define a sua rotação absoluta (WESTFALL, 1971).

Ainda no processo de revisão do *De Motu* Newton completou seu conceito de massa. A ‘força inerente’¹⁸ da matéria é proporcional e idêntica à inatividade da sua massa. Para os cartesianos, ao contrário, força inerente diferia da inati-

¹⁸ O termo aqui já é empregado em termos do princípio de inércia, ou seja, uma resistência à mudança de estado. Interessante notar como uma mudança conceitual ocorre não necessariamente de forma concomitante com uma mudança terminológica.

vidade da matéria, pois se a matéria está inativa não pode se ‘esforçar’ para resistir a uma mudança de estado. Newton reage a isso estabelecendo nas leis a concepção de que a matéria não tem a capacidade de ‘autoagir’ (iniciar uma ação) mas, sendo submetida a uma ação externa, de resistir a tal ação. Esse paradoxo fica explicitado através do termo empregado por Newton, *vis inertiae* ou “atividade da inatividade” (WESTFALL, 1971, p. 450).

Durante as revisões do *De Motu*, Newton chegou a definir seis tipos de força: (i) força inerente – é a resistência de um corpo à mudança do seu estado de movimento ou de repouso; (ii) força exercida – é um suplemento desse novo conceito de força inerente. Representa a forma manifesta dessa última quando o corpo sofre uma força impressa devido a outro corpo. Proporcional a essa força impressa, é a força exercida para reagir a esta. Trata-se de um passo gradual para a conhecida terceira lei de Newton; (iii) força de movimento – é uma tentativa de Newton de salvar a ideia antiga de força inerente, ou seja, uma força interna que faz o corpo perseverar no seu estado; (iv) força impressa – é um termo geral para qualquer força externa que atue sobre um corpo para mudar seu estado; (v) força centrípeta – um tipo de força impressa atuando em um corpo no caso do movimento circular e voltada para o centro da rotação; (vi) força de resistência – outro tipo de força impressa, é exercida sobre um corpo por um meio resistente. Depois, Newton cancelou essas definições deixando apenas dois tipos de força em sua mecânica: força inerente – resistência à mudança de estado do corpo sendo proporcional à sua massa e, portanto, à própria mudança de estado; força impressa – para distinguir da primeira é a força que age em um corpo devido a outro para mudar seu estado. Sua intenção era fazer uma distinção entre força interna e externa e a terceira lei estabelecia uma relação entre elas. Westfall (1971) conclui, assim, que é a revisão da terceira versão do *De Motu* que representa o momento de mudança conceitual significativo que tornou possível Newton escrever o *Principia* e chegar à sua GU.

Cohen (1983), por sua vez, discorda que havia uma confusão nos conceitos de força de Newton. Assim, ele oferece uma interpretação mais simplificada e considera que, para entender as leis de Newton no período compreendido entre 1679 (início da correspondência com Hooke) e 1686 (última revisão do *De Motu*), é preciso levar em conta apenas os seguintes conceitos de força: força externa – impressa a um corpo, devido a outro, causando uma mudança de estado; força interna – oferece resistência à mudança de estado provocada por uma força externa; força contínua – caso limite da sucessão de forças de impacto quando o intervalo de tempo entre estas tende a zero. Cohen (1983), em complemento, acentua que para se compreender como Newton chegou à GU é necessário entender tam-

bém o “estilo newtoniano” de tratar as forças ‘como se’ fossem reais, através da simplificação do sistema físico a formas matematicamente tratáveis. Assim, em não conseguindo provar a causa da força gravitacional (aquilo que possibilitaria a ação à distância), apoiou-se na força dos resultados matemáticos¹⁹.

A despeito de fazer uma discussão mais geral e menos enfocada em minúcias quanto ao processo de transformação dos conceitos de força em Newton – num estilo diferente de Westfall (1971) que, em adição, se concentrou na análise mais detalhada dos manuscritos não publicados – Cohen (1983) apresenta uma discussão sobre a relação que Newton fez entre a força aplicada a um corpo do ponto de vista macroscópico e a força aplicada às partículas de matéria que constituem esse corpo. Segundo Cohen, essas forças têm a mesma natureza para Newton e a força total aplicada ao corpo é dada pelo somatório das forças aplicadas sobre as suas partículas. No *Principia*, Newton afirmou categoricamente a realidade da força gravitacional sobre o corpo, entretanto, quanto à força sobre as partículas, ele apenas fez suposições bastante cautelosas em um rascunho daquilo que seria o prefácio inicialmente destinado à primeira edição do *Principia*, mas que foi suprimido. O argumento para isso aparece em um manuscrito reproduzido por Cohen em uma nota de fim, na qual Newton fala da sua segurança quanto à realidade da GU, bem como da relação intrínseca desta com as forças que atuam sobre as partículas, pois sendo “a natureza simplíssima e plenamente consonante consigo mesma” (ver COHEN, 1983, p. 375, nota 18), haveria de regular as partículas constituintes dos corpos à mesma maneira destes. Contudo, ele não tinha como provar essa relação e como tal concepção destoava fortemente da filosofia aceita em sua época, Newton resolveu retirar o prefácio para não causar “prejuízo” ao livro como um todo (COHEN, 1983).

V. *Principia*

A sequência de passos que Newton seguiu no processo de construção para chegar à GU, conforme a afirmativa de Cohen, é a mesma que está presente tanto em *De Motu* como nas seções II e III do Livro I do *Principia*. Segundo Cohen, concordam com isso “quase todos os estudiosos de Newton (R. S. Westfall é uma

¹⁹ Vale ressaltar, entretanto, que Cohen (1983) admite que, em algum momento anterior à escrita do *Principia*, Newton se achava seguro de ter encontrado provas da existência da força de GU – a partir de um conjunto de fenômenos que, segundo ele, decorriam desta força – e, então, adotou uma postura realista passando a buscar, embora sem sucesso, a causa desta força.

notável exceção)” (COHEN, 1983, p. 373). Será apresentada, em seguida, essa sequência de passos acompanhando a reconstrução feita por Cohen (1983).

A seção II do Livro I do *Principia* inicia com a Proposição I (ver NEWTON, 2005), que também aparece em *De Motu*. A Proposição I mostra que um corpo inicialmente inercial, ao sofrer uma força central, se move de forma a obedecer à lei das áreas (Fig. 3). Isso dá um significado físico (dinâmico) à lei das áreas de Kepler, pois esta deixa de ser uma lei puramente matemática e passa a se tornar uma lei que fornece uma explicação de como ocorre o movimento de um corpo submetido a uma força central: um segmento traçado do centro de força ao corpo varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais descrevendo, no limite, um movimento curvo. Trata-se, portanto, de uma demonstração geral, uma vez que não especifica a natureza da força e nem o tipo de curva. É curioso notar que Cohen (1983, 1988) afirma que Newton mostrou na Proposição I que o movimento inercial – de **A** para **B** e de **B** para **c** – obedece à lei das áreas, entretanto, essa suposta demonstração não está feita na referida proposição. Newton apenas afirmou, sem demonstrar, que as áreas iguais dos triângulos **ASB** e **BSc** seriam descritas. Presumivelmente, Cohen estaria tentando explicitar o que está implicitamente assumido na proposição. De qualquer modo, é fácil demonstrar essa igualdade das áreas por simples operação geométrica.

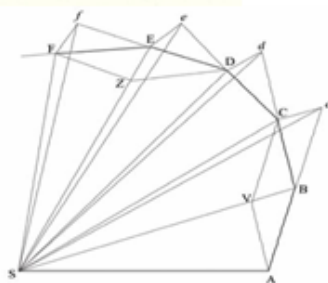


Fig. 3 – Um corpo se move inercialmente de **A** para **B** em um determinado intervalo de tempo. Caso continuasse este movimento reto iria de **B** até **c** no mesmo tempo. Contudo, ao chegar em **B** sofre a ação de uma força de impulso na direção de **S** e muda a direção do seu movimento indo até **C** no mesmo intervalo de tempo. Newton mostra na Proposição que as áreas dos triângulos **SBC** e **SAB** são iguais, portanto o movimento obedece à lei das áreas. O mesmo ocorre quando alcança os pontos **C**, **D**, **E**, **F** e assim sucessivamente, e no limite em que o número de triângulos aumenta e suas áreas diminuem proporcionalmente, a trajetória do corpo tende a uma curva. Figura extraída de Newton (2005).

A proposição II, que não aparece em *De Motu*, mostra o inverso da primeira. Um corpo que se move numa curva obedecendo à lei das áreas está sujeito a uma força central, cujo centro pode ser fixo ou móvel com velocidade constante. Na Proposição I, uma força central implica um movimento curvo, que obedece à lei das áreas e, na Proposição II, a trajetória curva que obedece à lei das áreas implica uma força central. Assim, as duas proposições juntas indicam que “a lei das áreas transformada fornece, nas mãos de Newton, uma condição necessária e suficiente para uma força centrípeta” (COHEN, 1983, p. 274).

A Proposição III, que também só aparece no *Principia*, é uma generalização da anterior para um centro de força que pode se mover acelerado. Isso é feito para conduzir o leitor à possibilidade de aplicar a dita proposição ao sistema físico Terra-Lua. As letras usadas por Newton para designar o centro de força (T) e o corpo que se move (L) corroboram isso.

Em seguida, Newton passou à Proposição IV, também presente em *De Motu*. Trata-se de uma proposição de grande importância, pois estabelece, pela primeira vez, uma medição da força centrípeta para o movimento circular uniforme e anuncia a possibilidade de extrapolação desse resultado para o caso dos corpos celestes. Abaixo, segue uma discussão desta Proposição e alguns dos seus corolários.

PROPOSIÇÃO IV. TEOREMA IV.

AS FORÇAS CENTRÍPETAS DOS CORPOS, QUE POR MOVIMENTOS UNIFORMES DESCREVEM CÍRCULOS DIFERENTES, TENDEM AOS CENTROS DOS MESMOS CÍRCULOS; E ESTÃO UMAS PARA AS OUTRAS DA MESMA FORMA QUE OS QUADRADOS DOS ARCOS DESCRITOS EM TEMPOS IGUAIS APLICADOS AOS RAIOS DOS CÍRCULOS.

Estas forças tendem aos centros dos círculos (pela Proposição 2 e Corolário 2 da Proposição 1) e estão umas para as outras da mesma forma que os versos-senos dos arcos menores descritos em tempos iguais (pelo Corolário 4, Proposição 1), ou seja, da mesma forma que os quadrados dos mesmos arcos aplicados aos diâmetros dos círculos (pelo Lema 7), e, portanto, já que estes arcos são proporcionais aos arcos descritos em quaisquer tempos iguais, e os diâmetros são proporcionais aos raios, as forças serão proporcionais aos quadrados de quaisquer arcos descritos no mesmo tempo aplicados aos raios dos círculos. Q.E.D.

Assim, em linguagem contemporânea, a Proposição IV afirma que

$$F \propto \frac{S^2}{R} \quad (1)$$

Nota-se que, embora a expressão (1) seja a conclusão da Proposição IV em si, o resultado de maior impacto veio com o Corolário 6 que segue à dita proposição. Para entender como Newton chegou a isso, serão reproduzidos e discutidos, em seguida, os corolários 1, 2 e 6 dessa Proposição:

COROLÁRIO 1. Portanto, já que estes arcos são proporcionais às velocidades dos corpos, as forças centrípetas estão em uma razão composta da razão direta dos quadrados das velocidades e da razão inversa simples dos raios.

Fig. 5 - Extraída de Newton (2005, p. 487).

Como, para tempos iguais, o resultado obtido por Galileu afirma que

$$S \propto v$$

utilizando isto na expressão (1), tem-se que

$$F \propto \frac{v^2}{R} \quad (2)$$

COROLÁRIO 2. E, já que os tempos periódicos estão em uma razão composta da razão direta dos raios e da razão inversa das velocidades, as forças centrípetas estão em uma razão composta da razão direta dos raios e do quadrado da razão inversa dos tempos periódicos.

Fig. 6 - Extraída de Newton (2005, p. 487).

Segundo Galileu

$$T \propto \frac{R}{v} \quad (3)$$

Substituindo (3) em (2), tem-se

$$F \propto \frac{R^2}{T^2}$$

Logo

$$F \propto \frac{R}{T^2} \quad (4)$$

COROLÁRIO 6. Se os tempos periódicos estão na raiz quadrada do cubo da razão dos raios, e portanto as velocidades inversamente na raiz quadrada da razão dos raios, as forças centrípetas estarão na razão inversa dos quadrados dos raios e vice-versa.

Fig. 7 - Extraída de Newton (2005, p. 488).

Sendo

$$T \propto \sqrt{R^3}.$$

A terceira lei de Kepler pode ser escrita na forma

$$T^2 \propto R^3 \quad (5)$$

Portanto, pelas expressões (3) e (5)

$$v \propto \frac{R}{T} \quad \therefore \quad v^2 \propto \frac{R^2}{T^2} \quad \therefore \quad v^2 \propto \frac{R^2}{R^3} \quad \therefore \quad v^2 \propto \frac{1}{R} \quad \therefore \quad v \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$$

Assim, substituindo (5) em (4)

$$F \propto \frac{R}{T^2} \quad \therefore \quad F \propto \frac{R}{R^3} \quad \therefore \quad F \propto \frac{1}{R^2}.$$

Essa relação estabelece que a força centrípeta que gera um movimento circular e uniforme é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o corpo que gira e o centro do círculo. Newton comenta no Escólio que sucede aos nove corolários da proposição IV que o resultado desse Corolário 6 “acontece nos corpos celestiais (conforme Sir Christopher Wren, dr. Hooke e dr. Halley observaram separadamente)” (NEWTON, 2005, p. 488). E anuncia que, por meio dessa proposição e seus corolários, “poderemos descobrir a proporção de uma força centrípeta para qualquer outra força conhecida, tal qual a da gravidade. Pois se um corpo, por meio de sua gravidade, gira em um círculo concêntrico à Terra, esta gravidade é a força centrípeta deste corpo” (NEWTON, 2005, p. 488-489). Os resultados dessa proposição são tão fundamentais para a elaboração da lei da GU, que Newton, no mesmo Escólio, tem a preocupação de demonstrá-la de outra maneira, usando a geometria de um polígono.

A Proposição V, que só aparece no *Principia*, apresenta “um modo claro de achar o centro de força, dada uma órbita e a velocidade em dois pontos quaisquer.” (COHEN, 1983, p. 283) e a Proposição VI, também encontrada em *De*

Motu, é uma generalização da Proposição IV, fornecendo um meio de medir a força centrípeta, através da expressão (3), para qualquer órbita com centro imóvel. Isso permitiu a Newton resolver os problemas das proposições VII a XIII, sintetizadas na tabela a seguir.

Proposição	Forma da órbita	Localização do centro de força	Lei de força
VII (também em <i>De Motu</i>)	Círculo	Qualquer ponto do círculo	$F \propto \frac{1}{R^2 C^3}$ R = altura do corpo (da posição do corpo na órbita ao centro de força) C = corda que sai do corpo e passa pelo centro de força
VIII	Semicircunferência	Ponto muito distante	$F \propto \frac{1}{R^3}$
IX	Espiral	Centro	$F \propto \frac{1}{R^3}$
X (também em <i>De Motu</i>)	Elipse	Centro	$F \propto R$
XI (também em <i>De Motu</i>)	Elipse	Um dos focos	$F \propto \frac{1}{R^2}$
XII	Hipérbole	Um dos focos	$F \propto \frac{1}{R^2}$
XIII	Parábola	Um dos focos	$F \propto \frac{1}{R^2}$

Há de se levar em conta que esses resultados apresentados por Newton eram considerados sempre no limite em que os arcos, cordas e tangentes tendiam a coincidir entre si por aproximação entre os extremos de tais linhas, portanto era com tais aproximações que os resultados eram válidos. A dificuldade de aceitação inicial do *Principia* por parte de muitos dos contemporâneos de Newton pode se

dever em grande parte à falta de familiaridade e mesmo compreensão dessa nova matemática que estava sendo utilizada e que foi por ele inventada.

Newton mostrou que, para o movimento orbital em uma elipse, em uma hipérbole e em uma parábola, a força, com centro nos respectivos focos, é inversamente proporcional ao quadrado da distância, logo ele generaliza os resultados das proposições XI, XII e XIII mostrando que, para secções cônicas, a força é do tipo $1/R^2$, resolvendo assim o ‘problema direto de Halley’²⁰.

No Corolário 1 da Proposição XIII, na primeira edição do *Principia* em 1687, ele enunciou o problema inverso, porém não fez nenhuma demonstração (COHEN, 1983; CUSHING, 1982). Isso gerou muitas críticas e somente na segunda edição em 1713 ele incluiu sentenças adicionais ao Corolário 1 e uma proposição (Proposição XVII) com a suposta prova do problema inverso. Entretanto, não há consenso entre os historiadores quanto à veracidade dessa prova. Robert Weinstock, por exemplo, considera que essa demonstração de Newton é falaciosa e que “Foi Johann Bernoulli, evidentemente, quem, em 1710, primeiro provou que a força do inverso do quadrado implica em uma órbita de secção cônica” (WEINSTOCK, 1982, p. 610). O argumento de Weinstock acerca dessa falácia é que o adendo de Newton ao Corolário 1 da segunda edição do *Principia* apenas estabelece que se um corpo orbita sob uma força do tipo $1/R^2$ descrevendo uma secção cônica, esta secção é unicamente determinada pelas condições iniciais, a saber, a posição e a velocidade do corpo. Cushing (1982) afirma que a Proposição XVII também estabelece a mesma coisa. Portanto, para Weinstock (1982) não se trata, do ponto de vista lógico, de uma prova do problema inverso e este autor cita, ainda, outro conhecido estudioso de Newton, J. Herivel, que também põe em dúvida, embora de forma mais contida, que Newton tenha resolvido com uma completa demonstração o referido problema.

Newton identificou, em um escólio do *De Motu*, essa lei de força com o movimento orbital dos planetas, entretanto retirou este escólio no *Principia*, pois reconheceu que esse movimento não ocorre com o centro de força fixo e sim móvel – a Terra e o Sol giram em torno do centro de gravidade comum a ambos – tratando-se, portanto, de um problema de dois corpos interagindo entre si. Assim, somente no *Principia* Newton compreendeu a atração mútua entre a Terra e o Sol como um caso particular da sua terceira lei – a lei geral de ação e reação. Vale ressaltar quanto a isso que em *De Motu* somente a primeira lei de Newton apare-

²⁰ O ‘problema direto de Halley’ é: dado o tipo de trajetória orbital, qual a lei de força? O problema inverso, portanto, é: dado que a força é do tipo $1/R^2$, qual a trajetória da órbita?

ceu explicitamente; a segunda lei apareceu implicitamente na Proposição I; e a terceira lei sequer apareceu, logo esta é uma novidade do *Principia*, o que “constitui um dos aspectos notáveis deste tratado” (COHEN, 1983, p. 284).

Cohen (1983, 1988) acentua o papel da terceira lei de Newton na compreensão deste acerca da interação mútua entre os corpos, e transcreve duas passagens do *Principia* que deixa isso claro, um trecho das quais será reproduzido a seguir:

A força atrativa encontra-se em ambos os corpos... Embora as ações de cada planeta sobre outro se possam distinguir entre si e possam ser consideradas como as duas ações pelas quais um atrai o outro, porém, como se trata de ações entre os mesmos dois corpos, não são duas ações, mas uma operação simples entre dois termos... A causa da ação é dupla, nomeadamente a disposição de cada um dos dois corpos; a ação é de outro modo dupla, na medida em que se exerce entre dois corpos; mas, por ser entre dois corpos, ela é singular e unitária. Não há, por exemplo, uma operação pela qual o Sol atraia Júpiter e outra operação pela qual Júpiter atraia o Sol, mas uma operação pela qual Júpiter e o Sol se atraem mutuamente (NEWTON, citado por COHEN, 1988, p. 297).

Newton considerou que, se a Terra e Sol interagem mutuamente, os demais planetas, juntamente com o Sol e a Terra, também devem interagir entre si, logo generalizou o problema de dois corpos para o problema de muitos corpos, que ele próprio reconheceu não haver solução exata (Cohen, 1988). Nesse sentido, conforme afirma Cohen, as leis de Kepler, que exerceram um papel fundamental na dinâmica planetária de Newton,

não são estritamente verdadeiras no mundo físico, mas são verdadeiras apenas para uma construção matemática na qual as massas pontuais não interatuam entre si e orbitam ou um centro de forças matemático ou um corpo estacionário que as atrai (Cohen, 1988, p. 296).

Assim, com uma postura instrumentalista, conforme afirma Cohen (1988), Newton mostrou, usando a terceira lei de Kepler – válida apenas por aproximação na dinâmica celeste de Newton – que a força de atração mútua entre o Sol e cada um dos planetas é exatamente a mesma e, em um momento posterior (no Livro III do *Principia*, que trata do ‘sistema do mundo’), mostrou que se trata da mesma força que age mutuamente entre a Terra e a Lua e igualmente a que

atrai os corpos na superfície da Terra devido a esta²¹. Assim, a essa força ele dá o nome de *gravidade*, conforme pode ser visto no Escólio à Proposição V do Livro III:

A força que retém os corpos celestiais em suas órbitas foi até aqui chamada de força centrípeta; mas, sendo tornado claro agora que não pode ser nenhuma outra senão uma força gravitacional, a chamaremos a partir de agora de gravidade. Pois, a causa desta força centrípeta que retém a Lua em sua órbita irá se estender para todos os planetas (NEWTON, 2005, p. 787).

Em seguida (na Proposição VII, Livro III), Newton estende essa generalização da força da gravidade como uma “propriedade universal de todos os planetas” para uma propriedade universal de todos os corpos (COHEN, 1983; CUSHING, 1982), convertendo-a “em uma ‘gravitação universal’, em uma força que atua mutuamente sobre e entre qualquer par de mostras de matéria em qualquer parte do universo” (COHEN, 1983, p. 286). Um aspecto adicional que aumentou ainda mais o grau de generalização da atração gravitacional foi a sua explicação, no Livro III, do movimento dos cometas que ele tratou como espécies de planetas que se moviam com trajetórias elípticas (para os periódicos, que retornavam) ou parabólicas (para os não periódicos, que não retornavam) interagindo gravitacionalmente com o Sol. Isso aumenta ainda mais a amplitude da lei da gravitação universal de Newton, estendendo a ação gravitacional do Sol aos confins do universo.

VI. Implicações para o Ensino da GU

Há uma ampla literatura disponível discutindo o uso da história da ciência no ensino de ciências e, em particular, no ensino de física (MATTHEWS,

²¹ Newton fez essa demonstração na Proposição IV do Livro III do *Principia*, a partir de uma interessante experiência de pensamento no qual supõe a Lua caindo em direção à Terra e calcula a aceleração que atrai a Lua em sua órbita em direção à Terra, comparando em seguida com a aceleração de um corpo na superfície desta, chegando a resultados suficientemente próximos para concluir que se trata da mesma aceleração, logo da mesma força. Cohen (1983) chama a atenção, contudo, para a suspeita de Westfall de que Newton manipulou os dados para obter essa exatidão entre teoria e observação. Uma discussão interessante dessa proposição e de como usá-la didaticamente em salas de aula de física encontra-se em Freire et al. (2004).

1994; AIKENHEAD, 2003; ROBINSON, 1969; ABD-EL-KHALICK; LEDERMAN, 2000; CARVALHO; VANNUCCHI, 2000; DEDES; RAVANIS, 2009; GALILI; HAZAN, 2000, 2001; HEERING, 2000; HOSSON; KAMINSKI, 2007; KLOPFER; COOLEY, 1963; NOTT, 1994; OGUNNIYI, 1987; POCOVÍ, 2007; SEKER; WELCH, 2006; SOLBES; TRAVER, 2003; SEROGLU; KOU-MARAS, 2001). Nessa mesma literatura, pode se encontrar várias formas de implementar esse tipo de abordagem, seja em relação aos objetivos de ensino (uso da história da ciência com vistas a alcançar: aprendizagem conceitual, natureza da ciência, atitudes em direção à ciência, argumentação, metacognição); seja em relação às estratégias de ensino (uso de história da ciência de forma: integrada com o assunto da física, integrada com outra estratégia de ensino, não-integrada); ou seja ainda em relação ao uso dos materiais didáticos (narrativas históricas, biografias, réplicas de experimentos históricos, problemas historicamente contextualizados, histórias de vida de cientistas) (TEIXEIRA et al., 2009). Portanto, não se pretende, nesta seção, fazer uma discussão sobre as razões e as formas para o uso didático da história da ciência. A intenção, aqui, é apenas discutir quais possíveis benefícios que o debate historiográfico acima apresentado pode trazer para auxiliar um professor que pretenda usar a história da ciência como forma de abordar o tópico Gravitação Universal de Newton em sala de aula.

Nesse sentido, um primeiro aspecto que chama a atenção é em relação à imagem de ciência e dos cientistas que o referido debate pode propiciar aos estudantes de graduação (em especial, os de licenciatura em física)²². Como é bem conhecido da literatura, o ensino de ciências convencional tem propiciado uma imagem de ciência e do trabalho dos cientistas muito distante da realidade (GILPEREZ et al., 2001). O debate historiográfico apresentando as visões de Cohen e Westfall sobre os passos de Newton em direção à GU pode ser benéfico nesse sentido por tornar explícito o fato de que Newton desenvolveu esse conhecimento através de um processo lento, trabalhoso e com a contribuição de outros estudiosos, portanto, longe de ter sido obtido por meio de *insights* como é divulgado, por exemplo, no inverossímil episódio da ‘queda da maçã’, encontrado em livros didáticos de física, tais como Máximo e Alvarenga (1997), Lucie (1975), Resnick et al. (1996) e Hewitt (2002).

²² É assumido neste trabalho que, em função da profundidade com que foi tratado o debate historiográfico, parece mais apropriado que ele se destine, em princípio, a estudantes de graduação, especialmente aos futuros professores de física que poderão fazer uso didático do mesmo. Entretanto, com os devidos ajustes, nada impede que possa ser feita uma adaptação para os estudantes do Ensino Médio.

O debate mostra como Newton desenvolveu seus conceitos de força, que inicialmente concebia a ideia de força inerente, ainda sob influência da visão medieval do ímpeto, ou seja, da necessidade da existência de uma força para a produção e manutenção do movimento e somente quinze ou vinte anos depois – a depender da interpretação do historiador – sob influência da interlocução com seus pares, aderiu ao conceito de inércia. O debate também ilustra os processos de transformação de pensamento pelos quais Newton passou até amadurecer sua visão de mundo e chegar a uma concepção acerca do movimento planetário que o permitiu elaborar a lei da GU. Os conceitos inicialmente equivocados de força e os primeiros cálculos errados do ‘teste da Lua’ são exemplos desses processos de mudança. Ademais, as diferenças nas interpretações de Cohen e Westfall sobre a relação que Newton estabelecia entre o conceito de força e o mundo real, o primeiro defendendo uma postura instrumentalista e o segundo defendendo uma postura realista, podem contribuir para uma discussão epistemológica em sala de aula sobre realismo e instrumentalismo na ciência.

Assim, todos esses aspectos presentes nas reconstruções apresentadas nas seções anteriores podem contribuir para propiciar aos estudantes visões mais críticas e mais próximas de concepções pós-positivistas sobre determinados aspectos acerca da natureza da ciência²³, tais como: o conhecimento científico é coletivo, cultural, conjectural, provisório e dinâmico, é influenciado por aspectos subjetivos, não é rígido nem linearmente construído, dentre outros (GIL-PEREZ et al., 2001; LEDERMAN et al., 2001; OSBORNE et al., 2003). Em adição, aquelas reconstruções podem auxiliar também para a ruptura de visões mitificadas do trabalho do cientista, tais como a de que a ciência é produzida por ‘gênios iluminados pelo dom da sabedoria’, muito comuns na imagem geral que os estudantes têm do cientista (GIL-PEREZ et al., 2001).

Outro aspecto que pode ser enfatizado em termos de implicações pedagógicas da revisão desenvolvida neste trabalho diz respeito à aprendizagem conceitual. É bem verdade que não há consenso na literatura quanto aos benefícios do uso didático da história da ciência na aprendizagem dos conceitos científicos

²³ Sabe-se da dificuldade de se chegar a um termo comum sobre o que pode ser considerada uma visão adequada sobre a natureza da ciência, de acordo com as concepções epistemológicas predominantes num dado período. Assume-se aqui, portanto, que é possível propor um número de características atualmente pouco ou não controversas sobre a natureza da ciência em acordo com uma visão pós-positivista da ciência, que passou a tomar corpo a partir da década de sessenta (ver LAUDAN, 2003; MCEVOY, 2007; ROSA, 2006).

(TEIXEIRA et al., 2009), entretanto há relatos da ocorrência de efeitos positivos desse uso (GALILI; HAZAN, 2000; POCOVÍ, 2007; OGUNNIYI, 1987; HOS-SON; KAMINSKI, 2007; DEDES; RAVANIS, 2009). Assumindo essa possibilidade, pode-se afirmar que a discussão histórica sobre a dificuldade de Newton na elaboração da sua dinâmica orbital antes de ter devidamente compreendido os conceitos de inércia e de força centrípeta remete à importância pedagógica para o entendimento destes conceitos por parte dos graduandos com vistas a uma melhor compreensão da GU de Newton.

Há trabalhos que mostram as dificuldades dos estudantes na compreensão da ação gravitacional (LEBOEUF; BORGES, 2002)²⁴. Assim, a referida revisão pode contribuir para a identificação, por parte dos estudantes, dos conceitos anteriores de Newton – sobre força inerente e sobre o equilíbrio entre força centrífuga e gravidade solar – com suas próprias concepções a esse respeito; isso pode ajudar na compreensão das transformações de pensamento em Newton e da necessidade dos conceitos de inércia e de força centrípeta para a GU newtoniana; logo, pode servir como estímulo para um melhor entendimento dos próprios conceitos referidos²⁵.

Outra maneira com que o debate pode contribuir para uma melhor compreensão conceitual diz respeito à própria dedução matemática da lei da GU de Newton, conforme apresentada em muitos livros didáticos de física, tais como Lucie (1975), Nussenzveig (1981) e Alonso e Finn (1972). Nessas deduções, é feita uma aproximação do movimento orbital de um planeta em torno do Sol a uma órbita circular e uniforme e, com uso da expressão da aceleração centrípeta e da terceira lei de Kepler, se deduz a lei de força como inversamente proporcional ao quadrado da distância planeta-Sol (CUSHING, 1982)²⁶. Como nessa dedução

²⁴ Deve-se considerar, entretanto, que o referido trabalho foi feito com estudantes da educação básica.

²⁵ Vale esclarecer que não se está assumindo aqui a ideia de paralelismo entre ontogênese e filogênese como base para a mudança conceitual, já bastante criticada na literatura (MATTHEWS, 1994; DRIVER; EASLEY, 1978; ROWLANDS et al., 1999; MOREIRA; GRECA, 2003). Mas, que a conscientização pelos estudantes das suas próprias concepções com o auxílio da história da ciência e a compreensão das transformações conceituais historicamente contextualizadas, podem contribuir para um entendimento dos novos conceitos científicos sem necessariamente incorrer em abandono das concepções prévias.

²⁶ Em muitos livros didáticos de física, entretanto, a lei da GU de Newton é apresentada diretamente ao leitor sem que essa dedução seja feita, sendo que, em alguns casos, se

não aparece a massa do Sol, são feitos alguns artifícios para resolver esse problema. No caso dos livros de Nussenzveig (1981) e Alonso e Finn (1972) é usada a terceira lei de Newton como artifício para incluir de forma *ad hoc* a massa do Sol, sem uma discussão mais pormenorizada do argumento usado por Newton para dar significado a essa operação. No caso do livro de Lucie (1975), essa massa aparece embutida numa constante geral K , que envolve as demais constantes ($4\pi^2 R^3/T^2$), sem discutir, entretanto, como e porquê a massa do Sol aparece na constante. Esses procedimentos levam à ‘aceitação’ do resultado da dedução sem uma devida compreensão conceitual, sendo que essa última pode ser alcançada de melhor maneira quando o argumento original é apresentado (CUSHING, 1982).

Como salienta Cushing (1982), em nenhum lugar do *Principia* aparece a fórmula $F=GMm/R^2$, logo esta é uma reconstrução contemporânea de um resultado histórico, o que precisa ser feito com cuidado para não incorrer em uma excessiva simplificação da história, distorcendo-a do seu sentido original (BIZZO, 1992; WHITAKER, 1979). A reconstrução histórica feita nas seções precedentes, ao mostrar o argumento de Newton para explicar a interação gravitacional entre o planeta e o Sol a partir da sua terceira lei de movimento em termos de uma única “operação pela qual Júpiter e o Sol se atraem mutuamente”, por conta de que “a força atrativa encontra-se em ambos os corpos” e, assim, “como se trata de ações entre os mesmos dois corpos, não são duas ações, mas uma operação simples entre dois termos” (NEWTON, apud COHEN, 1988, p. 297), torna mais claro conceitualmente o significado da presença das duas massas na lei de força gravitacional²⁷. Quando se pensa na terceira lei de Newton em termos de duas operações independentes, ou seja, em uma ação e, como consequência, uma reação, passam-se intuitivamente duas ideias equivocadas: a de que há uma diferença temporal entre uma operação e outra; e a de que cada uma dessas operações, uma vez independentes entre si, guarda uma relação com a massa do corpo que é agido, ou seja, ao se pensar no Sol agindo sobre o planeta, faz sentido na expressão a presença da massa do planeta, mas não a do Sol, e vice-versa. Portanto, quando se traz à tona o argumento de Newton em termos de uma única ação atuando simultaneamente

deduz as leis de Kepler após a lei da GU ser apresentada. São exemplos de tais livros: Resnick et al. (1996), Halliday et al. (1996), Gonçalves e Toscano (1997), Amaldi (1995), Chaves (2001), McKelvey e Grotch (1979), Orear (1975), Sears et al. (1985), Serway (1996), Máximo e Alvarenga (1997), Tipler (1995), Gaspar (2000), Paraná (2002), Ramalho et al. (2007). Nota-se que foram incluídos aqui livros universitários e do Ensino Médio.

²⁷ O livro didático de Keller et al. (1997) apresenta uma discussão da lei da GU de Newton com um enfoque similar.

nos dois corpos, fica conceitualmente explícita e justificada a presença das duas massas na expressão acima.

Um último aspecto a se discutir aqui é quanto à possibilidade do debate historiográfico apresentado neste trabalho propiciar uma melhor habilidade de argumentação nos estudantes sobre a GU. Vários trabalhos têm apontado a importância da argumentação como parte da educação científica (ABI-EL-MONA; ABD-EL-KHALICK, 2006; ERDURAN et al., 2004; ALBE, 2008; MUNFORD; ZEMBAL-SAUL, 2002; JIMÉNEZ-ALEIXANDRE et al., 2000a,b). Alguns trabalhos (HOSSON; KAMINSKI, 2007; CARVALHO; VANNUCCHI, 2000; TEIXEIRA et al., 2010), em particular, salientam o papel de uma abordagem histórica do ensino de física na melhoria da capacidade de argumentação dos estudantes, “nós podemos afirmar, em primeiro lugar, que discussões histórico-filosóficas podem contribuir para o desenvolvimento de habilidades cognitivas e de argumentação” (CARVALHO; VANNUCCHI, 2000, p. 442). O principal argumento para isto é que o envolvimento dos estudantes em atividades dialógicas em sala de aula os habilita a melhor desenvolver sua capacidade de argumentação sobre o conteúdo – objeto da discussão – em função da exposição dos estudantes à prática de expressar e defender suas ideias e de se contrapor às dos outros.

O envolvimento dos estudantes em atividades discursivas sobre controvérsias científicas, como as que Newton esteve envolvido em quase todo o seu percurso em direção à GU, conforme foi apresentado no debate historiográfico que precedeu esta seção aparece, portanto, como uma vantajosa ferramenta pedagógica que, utilizando a história da ciência, pode propiciar melhor destreza na argumentação dos estudantes sobre o que aprenderam em relação à GU.

Referências

ABD-EL-KHALICK, F.; LEDERMAN, N. G. The Influence of History of Science Courses on Students' Views of Nature of Science. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 37, n. 10, p. 1057-1095, 2000.

ABI-EL-MONA, I.; ABD-EL-KHALICK, F. Argumentative Discourse in a High School Chemistry Classroom. **School Science and Mathematics**, v. 106, n. 8, p. 349-361, 2006.

ABRANTES, P. **Imagens de Natureza, Imagens de Ciência**. São Paulo: Papirus, 1998. 248p.

AIKENHEAD, G. S. Review of Research on Humanistic Perspectives in Science Curricula. In: EUROPEAN SCIENCE EDUCATION RESEARCH ASSOCIATION (ESERA), 2003, Noordwijkerhout, The Netherlands. 19-23.

ALBE, V. When scientific knowledge, daily life experience, epistemological and social considerations intersect: students' argumentation in group discussions on a socio-scientific issue. **Research in Science Education**, v. 38, n. 1, p. 67-90, 2008.

ALONSO, M.; FINN, E. **Física: Um Curso Universitário. Mecânica**. Tradução: Giorgio Mascati. São Paulo: Edgard Blucher, 1972. v. 1

AMALDI, U. **Imagens da Física**. São Paulo: Scipione, 1995.

ASSIS, A. K. T. **Uma nova Física**. São Paulo: Perspectiva, 1999. 176p.

BASSALO, J. M. F. **Crônicas da Física**. Tomo 3. Belém: EDUFPA, 1992. 401p.

BIZZO, N. M. V. História da Ciência e Ensino: Onde terminam os paralelos possíveis? **Em Aberto**, v. 11, n. 55, p. 29-35, 1992.

CARVALHO, A. M. P.; VANNUCCHI, A. I. History, Philosophy and Science Teaching: Some Answers to "How?" **Science and Education**, v. 9, n. 5, p. 427-448, 2000.

CHAVES, A. **Física. Mecânica**. Rio de Janeiro: Reichmann & Affonso, 2001. v. 1

COHEN, I. B. **La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas**. Tradução: Carlos Solís Santos. Madrid: Alianza Editorial, 1983. 425p.

COHEN, I. B. **O nascimento de uma nova Física**. Tradução: Maria Alice Gomes da Costa. Lisboa: Gradiva, 1988. 305p.

CUSHING, J. T. Kepler's Laws and Universal Gravitation in Newton's Principia. **American Journal of Physics**, v. 50, n. 7, p. 617-628, 1982.

DEDES, C.; RAVANIS, K. Teaching image formation by extended light sources: the use of a model derived from the History of Science. **Research in Science Education**, v. 39, n. 1, p. 57-73, 2009.

DIAS, P. M. C. $F = ma$?!! O nascimento da lei Dinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 2, p. 205-234, 2006.

DOBBS, B. J. T. **The Foundations of Newton's Alchemy**. Cambridge: University Press, 1974.

DRIVER, R.; EASLEY, J. Students and paradigms: a review of literature related to concept development in adolescent science students. **Studies in Science Education**, v. 5, p. 61-84, 1978.

ERDURAN, S.; SIMON, S.; OSBORNE, J. TAPing into argumentation: developments in the application of Toulmin's argument pattern for studying science discourse. **Science Education**, v. 88, n. 6, p. 915-933, 2004.

FREIRE, O.; MATOS, M.; VALLE, A. Uma exposição didática de como Newton apresentou a força gravitacional. **Física na Escola**, v. 5, n. 1, 2004.

GALILI, I.; HAZAN, A. The influence of an historically oriented course on students' content knowledge in Optics evaluated by means of facets-schemes analysis. **American Journal of Physics**, v. 68 (S1), S3-S15, 2000.

GALILI, I.; HAZAN, A. The Effect of a History-based Course in Optics on Students' Views about Science. **Science and Education**, v. 10, n.1-2, p. 7-32, 2001.

GASPAR, A. **Física**. Mecânica 1. São Paulo: Ática, 2000.

GIL-PEREZ, D.; MONTORO, I. F.; ALÍS, J. C.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência e Educação**, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

GONÇALVES, A.; TOSCANO, C. **Física e Realidade**. Mecânica.. São Paulo: Scipione, 1997. v.1

HALL, A. R. Newton on the calculation of central forces. **Annals of Science**, v. 13, p. 62-71, 1957.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física 2**. 4. ed Rio de Janeiro: LTC, 1996.

HEERING, P. Getting shocks: Teaching Secondary School Physics through History. **Science and Education**, v. 9, n. 4, p. 363-373, 2000.

HEWITT, P. G. **Física Conceitual**. Tradução: Trieste Freire Ricci e Maria Helena Gravina. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

HOSSON, C.; KAMINSKI, W. Historical controversy as an educational Tool: Evaluating elements of a teaching-learning sequence conducted with the text “Dialogue on the Ways that Vision Operates”. **International Journal of Science Education**, v. 29, n. 5, p. 617–642, 2007.

JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, M.; MUÑOZ, C; CUADRADO, V. (2000a). Expertise, argumentation and scientific practice: A case study about Environmental Education in the 11th Grade. In: ANNUAL MEETING OF THE NATIONAL ASSOCIATION FOR RESEARCH IN SCIENCE TEACHING (NARST), 2000a, New Orleans, L.A. (ERIC Document Reproduction Service no ED 439 960).

JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, M.; RODRÍGUEZ, A.; DUSCHL, R. “Doing the Lesson” or “Doing Science”: Argument in High School Genetics. **Science Education**. v. 84, n. 6, p. 757-792, 2000b.

KELLER, F.; GETTYS, W.; SKOVE, M. **Física**. São Paulo: Makron Books, 1997. v. 1.

KLOPFER, L. E.; COOLEY, W. W. The History of Science cases for High Schools in the development of student understanding of science and scientists: A report on the HOSC Instruction Project. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 1, n. 1, p. 33-47, 1963.

LAUDAN, R. Positivism and Scientism. In: HEILBRON, J. L. (Ed.). **The Oxford Companion to the History of Modern Science**. New York: Oxford University Press, 2003. p. 670-671.

LEBOEUF, H. A.; BORGES, A. T. (2002). Cai por causa do ar: a gravidade como ação à distância. In: EPEF, VIII, 2002, Águas de Lindóia, SP. **Resumos...** Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/viii/PDFs/CO14_2.pdf>. Acesso em: 13 out. 2009.

LEDERMAN, N. G.; SCHWARTZ, R. S.; ABD-EL-KHALICK, F.; BELL, R. L. Pre-service teachers’ understanding and teaching of the nature of science: An intervention study. **Canadian Journal of Science, Mathematics, and Technology Education**, v. 1, p. 135-160, 2001.

LUCIE, P. **Física Básica 1**. Rio de Janeiro: Fundação Cesgranrio, 1975. 373p.

MCEVOY, J. G. Modernism, postmodernism and the historiography of science. **Historical Studies in the Physical and Biological Sciences**, v. 37, n. 2, 383-408, 2007.

MATTHEWS, M. **Science Teaching**: The role of History and Philosophy of Science. New York: Routledge, 1994.

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. **Curso de Física 1**. São Paulo: Scipione, 1997. 392p.

MCKELVEY, J.; GROATCH, H. **Física 2**. São Paulo: Harbra, 1979.

MOREIRA, M. A.; GRECA, I. M. Cambio conceptual: Análisis crítico y propuestas a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. **Ciência & Educação**, v. 9, n. 2, p. 301-315, 2003.

MUNFORD, D.; ZEMBAL-SAUL, C. Learning Science Through Argumentation: Prospective Teachers' Experiences in an Innovative Science Course. In: ANNUAL MEETING OF THE NATIONAL ASSOCIATION FOR RESEARCH IN SCIENCE TEACHING (NARST), 2002, New Orleans, L.A. (ERIC Document Reproduction Service nº ED 465 520).

NEWTON, I. Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural. In: HAWKING, S. **Os Gênios da Ciência: sobre os Ombros de Gigantes**. Tradução: Sergio M. Dutra. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. p. 441-638.

NOTT, M. Teaching Physics and the Nature of Science Together: A Case Study. **Physics Education**, v. 29, n. 3, p. 170-176, 1994.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 1**. Mecânica. São Paulo: Edgard Blucher, 1981. 519p.

OGUNNIYI, M. B. Conceptions of traditional cosmological ideas among literate and nonliterate nigerians. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 24, n. 2, p. 107-117, 1987.

OREAR, J. **Física**. Rio de Janeiro: LTC, 1975.

OSBORNE, J.; COLLINS, S.; RATCLIFFE, M.; MILLAR, R.; DUSCHL, R. What “Ideas-about-Science” Should Be Taught in School Science? A Delphi Study of the Expert Community. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 40, n. 7, p. 692–720, 2003.

PARANÁ. **Física**. 3. ed. São Paulo: Ática, 2002. v. único.

PEDUZZI, L. O. Q. **Da Física e da Cosmologia de Descartes à Gravitação Newtoniana**. Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. 109p.

POCOVÍ, M. C. The effects of a history-based instructional material on the students’ understanding of field lines. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 44, n. 1, p. 107-132, 2007.

RAMALHO, F.; FERRARO, N.; TOLEDO, P. **Os Fundamentos da Física 1. Mecânica**. 9. ed. São Paulo: Moderna, 2007.

RATTANSI, P. M. Newton and the wisdom of the ancients. In: FLAUVEL, J. et al. **Let Newton Be!** New York: Oxford University Press, 1988.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. **Física 2**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

ROBINSON, J. T. Philosophical and historical bases of science teaching. **Review Educational Research**, v. 39, n. 4, p. 459-471, 1969.

ROSA, L. P. **Tecnociências e Humanidades: Novos Paradigmas, Velhas Questões**. São Paulo: Paz e Terra, 2006.

ROWLANDS, S.; GRAHAN, T.; BERRY, J. Can we speak of alternatives frameworks and conceptual change in Mechanics? **Science and Education**, v. 8, p. 241-271, 1999.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M.; YOUNG, H. **Física 1. Mecânica da Partícula e dos Corpos Rígidos**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1985.

SEKER, H.; WELCH, L. C. The use of History of Mechanics in teaching motion and force units. **Science and Education**, v. 15, n. 1, p. 55-89, 2006.

SEROGLOU, F.; KOUMARAS, P. The contribution of the History of Physics in Physics Education: A review. **Science and Education**, v. 10, n. 1, p. 153-172, 2001.

SERWAY, R. **Física 1**. Mecânica e Gravitação. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

SOLBES, J.; TRAVER, M. Against a negative image of Science: History of Science and the teaching of Physics and Chemistry. **Science and Education**, v. 12, n. 7, p. 703-717, 2003.

TEIXEIRA, E. S.; SILVA, C. P.; FREIRE, O.; GRECA, I. (2010). A Construção de uma Argumentação sobre a Síntese Newtoniana a partir de Atividades em Grupos. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 15, n. 1, p. 61-95, 2010.

TEIXEIRA, E. S.; GRECA, I.; FREIRE, O. The History and Philosophy of Science in Physics Teaching: A research synthesis of didactic interventions. **Science and Education**, 2009. DOI 10.1007/s11191-009-9217-3.

TIPLER, P. **Física**. Gravitação, Ondas e Termodinâmica. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995. v. 2.

WEINSTOCK, R. Dismantling a Centuries-old Myth: Newton's Principia and Inverse-Square Orbits. **American Journal of Physics**, v. 50, n. 7, p. 610-617, 1982.

WESTFALL, R. S. **Force in Newton's Physics**. London: MacDonald; New York: American Elsevier, 1971.

WESTFALL, R. S. A vida de Isaac Newton. Tradução: Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

WHITAKER, M. A. B. History and quasi-history in Physics Education – Part 2. **Physics Education**, v. 14, p. 239-242, 1979.

WHITESIDE, D. T. Newton's early thoughts on planetary motion: A fresh look. **The British Journal for the History of Science**, v. 2, n. 6, p. 117-137, 1964.

WHITESIDE, D. T. Before the Principia: the maturing of Newton's thoughts on Dynamical Astronomy, 1664-1684. **Journal for the History of Astronomy**, v. 1, p. 5-19, 1970.

WILSON, C. From Kepler's laws, so-called, to Universal Gravitation: Empirical Factors. **Archive for History of Exact Sciences**, v. 6, p. 89-170, 1970.

Capítulo 4

Análise de uma Intervenção Didática com Uso de Abordagem Contextual com Enfoque na Argumentação

A CONSTRUÇÃO DE UMA ARGUMENTAÇÃO SOBRE A SÍNTESE NEWTONIANA A PARTIR DE ATIVIDADES EM GRUPOS¹

(The Construction of an Argumentation on the Newtonian Synthesis from Groups' Activities)

Elder Sales Teixeira [eldersate@gmail.com]

Departamento de Física/UEFS; PPGEFHC/UFBA-UEFS

Climério Paulo da Silva Neto [cpsneto@gmail.com]

Instituto de Física/UFBA; bolsista PIBIC/CNPq/UFBA

Olival Freire Jr. [freirejr@ufba.br]

Instituto de Física/UFBA; PPGEFHC/UFBA-UEFS

Ileana M^a Greca [ilegreca@hotmail.com]

Departamento de Física, Universidad de Burgos, España

Resumo

Este trabalho investiga a qualidade da argumentação dos alunos sobre a síntese newtoniana e a relação da qualidade dessa argumentação com o texto referência usado nas atividades em grupos desenvolvidas numa disciplina do Curso Noturno de Licenciatura em Física da UFBA. A pesquisa foi feita com alunos da disciplina Física Básica – I, que usa uma abordagem contextual de ensino, e desenvolvida através de método qualitativo com observação participativa, vídeo- e áudio-gravação das aulas. Foi usado, como instrumento de análise, a estrutura de argumentação de Toulmin. Resultados indicaram que a discussão em grupos e entre os grupos propiciou a construção de uma argumentação coletiva satisfatória, embora com limitações, sobre a síntese newtoniana e que a abordagem contextual, através do texto referência - que discute a experiência de pensamento da 'queda da lua' de Newton como fundamental para a síntese newtoniana - exerceu um papel fundamental na qualidade da construção dos discursos dos alunos.

Palavras-chave: Argumentação; Abordagem Contextual; Síntese Newtoniana; Atividades em Grupos.

Abstract

This paper analyses students' argumentation quality on the Newtonian synthesis and its relation with the instructional material used with students from the physics course at the UFBA titled Física Básica I, which is given through a contextual approach. The research was carried with a qualitative method, with participative observation and audio and video recording. As a theoretical tool we adopt Toulmin's argumentation structure. Results suggest that discussions intra and inter groups contributed to the building of a qualified collective argumentation, although with some restrictions, on the subject under debate. They also suggested that the contextual approach present in the text used in the course – a presentation of Newton's thought experiment on the moon's fall – was instrumental in enhancing the quality of students' speeches.

Keywords: Argumentation, Contextual Approach, Newtonian Synthesis, Groups' Activities.

Introdução

Pesquisadores em ensino de ciências têm atentado para o papel da argumentação como elemento essencial da educação científica e dedicado esforços de pesquisa para investigar este tema. Os principais fatores que têm sido relatados na literatura como benefícios de um ensino de ciências com preocupações quanto à argumentação são: aprendizagem não apenas dos conteúdos científicos

¹ Resultados parciais deste trabalho foram apresentados no VI ENPEC (ver Teixeira, E. S.; Silva, C. P. e Freire, O. Argumentação e Abordagem Contextual: Ensinando a Síntese Newtoniana. Em Mortimer, E. F. (ORG.). **Anais do VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**. Belo Horizonte: ABRAPEC. 2007. CD-ROM.

em si, mas também a aprendizagem sobre a ciência², pois propicia oportunidade de engajamento dos estudantes na cultura científica; desenvolvimento de aspectos metacognitivos, pois permite oportunidade de reflexão sobre suas próprias formas de pensamento; desenvolvimento de diferentes formas de pensamento, pois leva em conta fatores sócio-culturais na construção do conhecimento (Abi-El-Mona e Abd-El-Khalick, 2006; Erduran et al., 2004; Albe, 2008; Munford e Zembal-Saul, 2002; Jiménez-Aleixandre et al., 2000_{a,b}). Em geral, as pesquisas devotadas a este tema, assumem que o conhecimento científico é socialmente construído e que sua aprendizagem pode ser propiciada ao engajar os estudantes em atividades que envolvam sua interação social e que permitam serem expostos ao gênero do discurso da ciência, tais como, práticas de laboratório, trabalhos de investigação, atividades em grupo etc. (Mortimer e Scott, 2002; Jiménez-Aleixandre et al., 2000_b; Abi-El-Mona e Abd-El-Khalick, 2006; Sutton, 2003; Driver et al., 1994; Erduran et al., 2004; Albe, 2008). Essa assunção, por sua vez, tem seus pressupostos na idéia de Vigotski de que o pensamento do indivíduo é construído a partir da sua experiência sócio-cultural (Vigotski, 1934/2001).

Conforme salientam Abi-El-Mona e Abd-El-Khalick (2006), a adoção de atividades que promovam argumentação tem sido rara nas salas de aula de ciências do ensino em geral e, em particular, do ensino universitário. Há também uma necessidade de que mais pesquisas sejam feitas para avaliar o potencial destes recursos para promover a argumentação. Dentro desta perspectiva, este trabalho visa investigar a qualidade do discurso dos alunos na construção de uma argumentação coletiva sobre a síntese newtoniana, bem como investigar a relação entre a qualidade dessa argumentação e o texto didático usado como referência em atividades em grupos que foram desenvolvidas em sala de aula de uma disciplina inicial do Curso Noturno de Licenciatura em Física da UFBA, que é informada por uma abordagem contextual de ensino³.

A escolha da gravitação universal como tópico sobre o qual focar uma abordagem contextual poderia parecer uma escolha ditada apenas pela presença desse conteúdo nos programas de Física Geral que integram a formação dos Licenciados em Física. Nossa escolha, contudo, foi ditada por considerações mais amplas. A abordagem contextual foi utilizada ao longo de todo um curso que poderia adequadamente ser denominado de “a revolução copernicana”. De fato, embora o foco da investigação educacional aqui apresentada tenha se concentrado na introdução da gravitação, o programa do curso de Física Básica I da Licenciatura Noturna da UFBA cobre a origem da astronomia na antiguidade; a física e a cosmologia aristotélica; as disputas entre os dois sistemas cosmológicos na antiguidade; a física medieval; a obra de Copérnico, Bruno, Brahe, Kepler, Galileu, Descartes, Huygens e Newton; e a consolidação da mecânica newtoniana. A síntese newtoniana com a introdução da idéia de força gravitacional é apresentada assim como o capítulo final da revolução copernicana. Por outro lado, se é verdade que gravitação é parte dos programas de Física Geral, também é verdade que muitas vezes esse tópico não é valorizado nos livros textos (Freire, Matos e Valle, 2004, p. 25), e no caso do ensino médio brasileiro ele é muitas vezes simplesmente abandonado. A valorização da gravitação, com sua introdução feita através de abordagem contextual, foi, portanto, escolha ditada por considerações educacionais mais amplas, relacionadas aos próprios objetivos do ensino de física.

De fato, como afirmado por Rutherford e Ahlgren (1995, p. 173), “*foi a Isaac Newton, cientista inglês, que coube reunir todos esses fios [relacionados aos desenvolvimentos na mecânica e na astronomia] e avançar para além deles, criando a concepção do universo moderno.*” Nos Princípios Matemáticos da Filosofia Natural (Newton, 1687/1999), “*publicado perto do fim do*

² Para Matthews (1994), a educação científica não deveria ser apenas um treinamento em ciências, mas também, um ensino sobre ciências, o que significa que, além do conhecimento dos conteúdos das matérias e do desenvolvimento de habilidades científicas, os estudantes deveriam ter acesso a uma apreciação dos métodos, sua diversidade e suas limitações, enfim, uma apreciação sobre a natureza da ciência.

³ Abordagem de ensino de física informado pelas contribuições da História e da Filosofia da Ciência.

século XVII e destinado a ser um dos livros mais determinantes jamais escritos, Newton apresentou uma visão matematicamente perfeita do mundo que reuniu conhecimentos do movimento dos objectos na Terra e dos movimentos distantes dos corpos celestes”.

A escolha do programa dessa disciplina não apresenta, entretanto, originalidade. Na tradição educacional do ensino de física informado pelas contribuições da História e da Filosofia da Ciência, tanto a revolução copernicana como a síntese newtoniana têm sido consideradas itens fundamentais no conteúdo da Física, especialmente no ensino pré-universitário, uma vez compreendido que esse ensino deva ser conectado com a tradição cultural mais ampla. Sem investigar as origens mais remotas dessa opção programática, observamos que ela foi o tema com o qual Thomas Kuhn fez sua conversão de uma carreira em Física para uma carreira em História da Física, inicialmente ministrando na Universidade de Harvard um curso que tinha como título “O desenvolvimento da mecânica de Aristóteles a Newton”, e publicando em 1957 seu *A Revolução Copernicana* (Kuhn, 1957; 2003, p. 333-352). No mesmo ambiente da Universidade de Harvard, no qual a história da ciência como componente do ensino de ciências foi fortemente valorizada por James Conant, seu mais influente reitor, apareceria na década de 1960 aquele que ainda hoje pode ser considerado o melhor exemplar de material instrucional em ensino de física nos marcos da abordagem contextual, o *The Project Physics Course* (Matthews, 1994: 6; Holton, Rutherford e Watson, 1970).⁴ O programa da disciplina na qual realizamos tal investigação foi fortemente influenciado por esse material instrucional, e sua edição portuguesa é utilizada como bibliografia do mesmo curso. Não por acaso, a síntese newtoniana é um tópico central no denominado Projeto Harvard. Mais recentemente, o mesmo tópico, e abordagem semelhante foram valorizados tanto no programa do *Science for All Americans*, sugerido pela American Association for the Advancement of Science (Rutherford e Ahlgren, 1995), quanto na experiência francesa conduzida por Sonnevile e Fauque (1997). O desenho do programa da disciplina na qual realizamos a presente investigação foi, portanto, fortemente influenciado por essas tradições. A novidade da nossa comunicação não reside em relatar uma experiência didática com tal desenho programático, mas sim na investigação dos seus efeitos educacionais. Contudo, o uso do material instrucional (Freire, Matos e Valle, 2004), é uma abordagem didática inovadora vez que esse material explora o uso da apresentação da Proposição IV do Livro III dos *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, na qual Newton usa o recurso de um experimento de pensamento – a queda da Lua – para introduzir, pela primeira vez na história, a idéia de força gravitacional. A presente pesquisa pretende contribuir, inclusive, para o ulterior aprimoramento desse material instrucional.

Argumentação

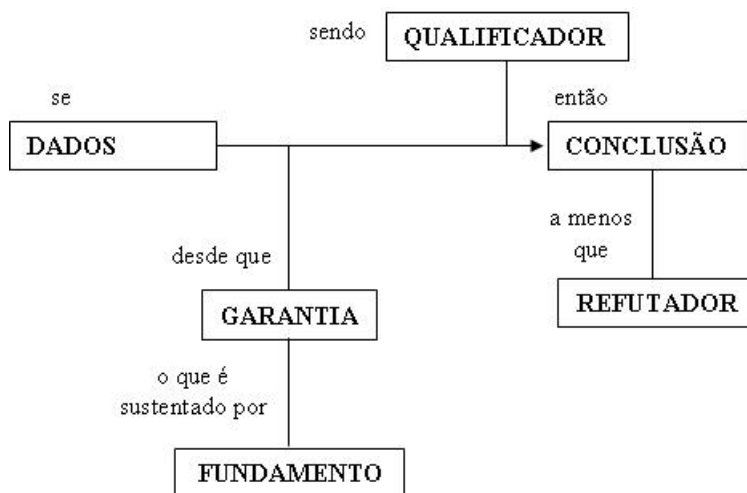
Para além dos benefícios, já apontados aqui, de um ensino de ciências focado na argumentação (Abi-El-Mona e Abd-El-Khalick, 2006; Erduran et al., 2004; Albe, 2008; Munford e Zemba-Saul, 2002; Jiménez-Aleixandre et al., 2000_{a,b}), o uso da argumentação na educação científica, segundo Erduran et al. (2004), pode ser justificado por razões de natureza epistemológica, bem como, cognitiva.

As razões epistemológicas advêm da noção de que a ciência progride muito mais em função da existência de conflitos do que de um acordo geral e a argumentação tem um papel fundamental em tais conflitos através das explicações e interpretações fornecidas pelos cientistas, além dos processos de validação e tomadas de decisão pelos mesmos, portanto aquela é central no discurso dos cientistas (Erduran et al., 2004; Driver et al., 2000). E promover uma compreensão dos processos da ciência tem sido uma das principais metas da educação científica (Matthews, 1994).

⁴ Referências sobre avaliação do uso do *The Project Physics* podem ser encontradas em Matthews (1994, p. 216, nota 8), e uma avaliação da própria elaboração do projeto em Welch (1971). A tradução portuguesa dos textos está esgotada.

As razões cognitivas partem do pressuposto de que ao serem envolvidos em atividades de argumentação os estudantes são levados a expor e discutir publicamente seu pensamento, submetendo-o à apreciação crítica dos outros e, assim, resignificando-o. Isto significa deslocar as idéias do plano intra-subjetivo (argumento retórico, pessoal, individual) para o plano inter-subjetivo (argumento dialógico, construído com a influência de diferentes vozes) e, conforme os autores (Erduran et al., 2004: 917), “a interação entre as dimensões pessoal e social promovem reflexividade, apropriação e o desenvolvimento de crescimento, crenças e valores”.

O modelo de argumentação de Toulmin tem sido frequentemente usado pelos pesquisadores em ensino de ciências, dentre outros, como ferramenta metodológica para analisar os processos argumentativos nas salas de aula de ciências (Abi-El-Mona e Abd-El-Khalick, 2006; Erduran et al., 2004; Albe, 2008; Munford e Zembal-Saul, 2002; Jiménez-Aleixandre et al., 2000_{a,b}). Toulmin (1958/2006) apresenta um modelo de estrutura de um argumento estabelecendo seus componentes, bem como as relações funcionais entre eles. Tais componentes são: **dados** – são os fatos que conduzem a uma conclusão; **conclusões** – são asserções, cujos méritos devem ser estabelecidos; **garantias** - são afirmativas hipotéticas gerais que servem de elo de ligação entre os dados e as conclusões e que autorizam essa ligação, ou seja, são as permissões contidas no argumento para se chegar às conclusões a partir dos dados; **fundamentos** - dão sustentação às garantias do argumento servindo, portanto, para legitimá-las. No caso da ciência, os fundamentos são as leis, princípios etc., partilhados pela comunidade científica; **refutador** - é uma condição de exceção para o argumento. É uma condição ou circunstância em que, caso a autoridade da garantia seja contrariada, invalida a conclusão; **qualificador** - é um operador modal sobre uma afirmativa, é uma condição no argumento, dependente de uma situação específica, que conduz a uma conclusão (Toulmin, 1958/2006; ver também Verheij, 2005).



Esquema de Toulmin para a argumentação

A sua qualidade de permitir identificar os componentes presentes em um argumento e, por contraste, aqueles que estão ausentes, bem como identificar também a relação entre eles, torna o modelo de argumentação de Toulmin um instrumento eficaz para analisar a qualidade de uma argumentação, o que justifica a sua adoção. Entretanto, este modelo não está isento de dificuldades. Uma delas diz respeito à possibilidade de ambiguidade na interpretação de determinada sentença que pode ser vista, por um lado, como uma conclusão e, por outro, como um dado ou garantia que poderia levar a uma outra conclusão. Contudo, esta dificuldade pode ser amenizada quando se concentra nas relações causais entre as sentenças ao longo do raciocínio como um todo. Mesmo sendo considerada isoladamente como uma conclusão, uma sentença pode, dentro do argumento como um todo, ser avaliada como um dado ou uma garantia para uma conclusão posterior, em função do seu papel no argumento (Erduran et al., 2004; Krummheuer, 2007).

Outra dificuldade diz respeito à limitação do modelo de Toulmin para interpretar as interações sociais entre os sujeitos ao elaborar um argumento coletivamente, visto que ele se concentra no conteúdo dos argumentos (seus componentes e sua estrutura) e não no papel das interações sociais entre os sujeitos na construção do argumento (Albe, 2008). Como forma de superar esta limitação foi usado aqui o instrumento desenvolvido por Mortimer e Scott (2002) para caracterizar as interações em sala de aula e, assim, permitir identificar o papel destas interações na construção coletiva do argumento.

A construção de uma argumentação coletiva em sala de aula deve ser produzida, em um primeiro momento, através do trabalho em grupos, em que cada estudante deve se inserir no tema e depois discutir suas conclusões com os outros membros do grupo. Desta discussão, por meio de negociação, se chega a um produto que representa a posição do grupo sobre o tema. Em seguida, a discussão se amplia para toda a turma, sendo que as posições dos grupos são validadas por todos em função de sua consistência e das conclusões oriundas da própria discussão coletiva. Tal consistência é apreciada em termos das palavras-chave (representar, comparar, explicar, justificar, concordar e validar) (Brown, 2007).

Segundo Krummheuer (2007), em uma pesquisa com estudantes do ensino fundamental de uma escola alemã para investigar a participação destes em processos de argumentação coletiva em uma sala de aula de Matemática, os estudantes que participam ativamente da produção da argumentação coletiva, contribuem para esta de duas formas: fornecendo sentenças, que por sua vez podem ser categorizadas em termos do modelo de Toulmin; e assumindo um determinado papel específico que revela sua autonomia enquanto membro do grupo.

Outro aspecto a ser salientado é a importância da participação do professor no gerenciamento da argumentação coletiva. Segundo Brown (2007: 120), *“o professor pode re-frasear, parafrasear e re-representar as contribuições dos grupos particulares, fazer conexões entre as contribuições, se referir a problemas prévios e relembrar as formas nas quais situações similares foram abordadas no passado”*. O professor pode desafiar os estudantes com questões, adicionar ao argumento coletivo aprimorando-o, além de poder avaliar diretamente o progresso dos alunos durante o processo de argumentação coletiva. Através desta forma de mediar os relatos dos grupos, o professor propicia condições, na prática, para estabelecer um sentido de comunidade científica para os estudantes (Brown, 2007).

Uma possível limitação, contudo, da estratégia de ensino através de argumentação coletiva, diz respeito à extensão em que se pode avaliar o avanço do entendimento individual dos estudantes sobre o conteúdo tratado, algo que precisa ser melhor investigado, conforme conclui Brown (2007) em uma pesquisa feita para investigar o envolvimento de estudantes de 11 a 12 anos de idade de uma escola australiana, inseridos em atividades de argumentação coletiva, em práticas que refletem as de uma comunidade de matemáticos.

Antes de passarmos ao contexto e metodologia da pesquisa, cabe assinalar que, em função de nossos compromissos educacionais mais amplos, o interesse de Toulmin nos procedimentos da argumentação não foi independente de sua visão de mundo e de sociedade. Para ele, o século XVII, que nós professores de ciências naturais apresentamos sempre orgulhosamente como o do nascimento da ciência moderna, teria sido também um momento de perda de equilíbrio da razão. Em seu *Cosmopolis* (Toulmin, 1992), ele apresenta um detalhado argumento histórico e epistemológico para explicar esse desequilíbrio, ao tempo em que aponta a necessidade, para a superação da crise da modernidade, de recuperação de formas de conhecimento que ficaram desvalorizadas no referido desequilíbrio. Não é o caso, aqui, de apresentarmos o argumento de Toulmin, mas apenas de apontarmos a sua conexão com o papel da argumentação. Em um texto sintético recente, Toulmin (2003, p. 254) afirma que “a partir de meados do século XVII, começou a desenvolver-se uma situação de desequilíbrio. Certos temas e métodos de investigação foram

considerados filosoficamente sérios ou ‘racionais’ de uma forma que não se aplicava a outros.” Essa hierarquização dos saberes, que ele explora sob o contraste entre as rubricas da “racionalidade” e da “razoabilidade”, pode ser exemplificada desse modo:

“O contraste entre a razoabilidade das narrativas e o rigor das provas formais, entre a autobiografia e a geometria, é o contraste entre a ‘solidez’ da ‘argumentação’ substantiva, que tem a estrutura e a força necessárias para transmitir confiança, e a ‘validade’ dos ‘argumentos’ formais, cujas conclusões são determinadas pelos pontos de partida dos quais eles são deduzidos” (Toulmin, 2003, p. 256).

A nossa opção pela análise da argumentação em sala de aula, em torno de um tópico específico de conteúdo da física, é, portanto, tanto motivada pelas possibilidades que vislumbramos para a pesquisa em ensino quanto animada pela idéia de que a valorização da argumentação substantiva contribui para aproximar o ensino de ciências de objetivos educacionais humanistas mais largos.

Contexto e metodologia

As aulas foram realizadas nos dias 30 de maio e 01 de junho de 2007 e estão descritas em mapas de aula⁵. Estas atividades constaram de discussões em grupos e entre os grupos com mediação do professor. As discussões foram baseadas no texto de Freire, Matos e Valle (2004), cuja leitura foi feita pelos alunos antes das aulas.

No início das atividades foi entregue um questionário contendo seis itens para orientar as discussões: (1) Explique como Newton comparou a aceleração da Lua em sua órbita com a aceleração da gravidade na superfície da Terra. Quais os artifícios que ele utilizou para isso? (2) Que argumentos Newton utilizou para justificar a adoção de uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância? (3) Qual o principal obstáculo enfrentado por Newton para introduzir a idéia de uma força gravitacional de ação à distância? Que saída ele encontrou para minimizar o problema? (4) O que você entende por síntese newtoniana? Qual a importância e implicações dessa síntese? (5) Que argumentos Newton utilizou para adotar o sistema Heliocêntrico? (6) Que conclusões você chega sobre o trabalho de Newton depois da leitura do artigo e da atividade em classe?

Na primeira aula foram discutidos os assuntos do texto referentes aos três primeiros itens do questionário e os grupos tiveram cerca de 50 minutos para discussão interna entre seus integrantes (discussão em grupos). Toda a aula foi gravada em vídeo e durante o período da discussão em grupos, a filmagem foi direcionada para um dos grupos. A partir de um trecho desta filmagem, no qual ocorreu um debate relevante entre seus membros sobre os assuntos em questão, e com o auxílio do mapa de aula, foi identificado o Episódio I que serviu para nortear a análise do processo interno de elaboração do argumento do grupo. Isto, conjuntamente com a análise das discussões entre os grupos, serviu como forma de validação interna da pesquisa.

Ao fim deste período foi aberta a discussão entre os grupos, mediada pelo professor, em que cada grupo apresentou seus argumentos frente aos itens do questionário. Em média, dois ou três alunos falavam pelo seu grupo, os demais permaneciam atentos à discussão. Os itens 1, 2 e 3 do questionário foram debatidos na sequência, um-a-um, sendo que, da discussão de cada item foi possível identificar momentos significativos de construção argumentativa, que vieram a constituir os três outros episódios de ensino desta aula. A feitura do mapa de aula foi fundamental para permitir essa identificação. Assim, os Episódios II, III e IV constam das discussões sobre os itens 1, 2 e 3, respectivamente.

⁵ Estes mapas de aula foram inspirados nos mapas apresentados por Amaral e Mortimer (2006).

Os outros três itens foram discutidos na aula seguinte, cujo procedimento se repetiu. Como se tratou de uma aula extra, houve uma pequena redução na frequência. Os grupos da aula anterior se repetiram, mas com algumas mesclas. Nesta aula, a gravação foi feita somente em áudio e o áudio-gravador (*pendrive*) era colocado próximo à pessoa que falava. Em média, dois ou três alunos falavam pelo seu grupo, sendo que os demais ficavam atentos. De forma similar ao que ocorreu na aula anterior, os itens 4, 5 e 6 do questionário foram debatidos na sequência, um-a-um, sendo que, da discussão de cada item foi possível identificar momentos significativos de construção argumentativa, que vieram a constituir os três episódios de ensino desta aula. O mapa da segunda aula foi fundamental para permitir essa identificação. Assim, os Episódios V, VI e VII constam das discussões sobre os itens 4, 5 e 6, respectivamente. No decorrer das atividades, a maior parte da turma participou das discussões gerando episódios muito ricos para a análise.

Para descrever a condução das atividades, em termos das interações sociais produzidas em sala de aula, foi usado o instrumento de Mortimer e Scott (2002) desenvolvido para analisar os tipos de interações entre professores e alunos em salas de ciências, bem como a produção de significados nas mesmas.

Baseando-se neste instrumento pôde-se fazer uma descrição da condução das atividades em seu contexto mais geral. Vale ressaltar que Mortimer e Scott (2002) usaram o instrumento para analisar, em seu trabalho, cada episódio individualmente. Aqui, contudo, o instrumento foi utilizado para fazer uma caracterização geral do conjunto dos episódios em termos do desenvolvimento das atividades realizadas.

Dentro dessa perspectiva pôde-se perceber que as atividades realizadas foram conduzidas sempre com a intenção de “eliciar” os argumentos dos alunos sobre a síntese newtoniana por meio das discussões, seja em pequenos grupos, seja com toda a turma, com vistas à construção de uma argumentação coletiva sobre esse tema. Esta argumentação foi construída em termos de uma explicação teórica sobre a síntese newtoniana, nos marcos do modelo astronômico heliocêntrico que se configurou no séc. XVII e da teoria gravitacional de Newton que deu suporte mecânico a este modelo, a partir da experiência idealizada da ‘queda da lua’ de Newton.

Em coerência com a intenção de trazer à tona os discursos dos alunos, as aulas foram conduzidas a partir de uma abordagem comunicativa que variava de Interativo/Dialógica (I/D) para Interativo/de Autoridade (I/A) para Não-Interativo/de Autoridade (NI/A) (ver Mortimer e Scott, 2002), na construção da argumentação coletiva sobre a síntese newtoniana. Esse padrão se repetiu em todos os episódios na medida em que o professor: primeiramente interagia com os grupos permitindo-os expor seus argumentos para discutir o assunto (I/D); fazia intervenções durante as discussões para corrigir alguns argumentos tomando o argumento da ciência como parâmetro (I/A); finalizava a discussão resumindo os argumentos construídos pelo coletivo, devidamente ajustados ao argumento cientificamente partilhado (NI/A). Característica semelhante foi encontrada por Mortimer e Scott (2002) ao analisar uma sequência de três aulas sobre ‘reações químicas’ em uma escola de ensino médio do norte da Inglaterra. Estes autores caracterizam esta repetição de padrões encontrados nos episódios como um “ritmo de ensino” e o qualificam como “*interessante, ao promover a aprendizagem no contexto da sala de aula*” (Mortimer e Scott, 2002, p. 24). Conforme pode ser visto mais adiante, nas tabelas que descrevem os episódios, foram produzidos padrões de interação tanto do tipo triádica (I-R-A), como não triádica (I-R-P-R-P... ou I-R-F-R-F...) e a intervenção ocorreu de modo que os constructos produzidos na sala puderam ser compartilhados com todos.

A investigação foi realizada no âmbito de uma turma de 30 alunos da disciplina Física Básica I do Curso Noturno de Licenciatura em Física da UFBA (Salvador - Bahia). Trata-se de uma pesquisa qualitativa, com observação participativa. As aulas nas quais foram realizadas as atividades referentes à pesquisa foram gravadas em vídeo ou em áudio que posteriormente foram

transcritos. O uso do equipamento para gravação em vídeo foi introduzido na sala três semanas antes da coleta de dados para familiarização dos alunos (Abi-El-Mona e Abd-El-Khalick, 2006; Carvalho, 2006). Foram tomados os devidos cuidados éticos, dentre os quais, o esclarecimento aos alunos sobre a pesquisa e o emprego do TCLE (Termo de Consentimento Livre e Esclarecido).

Para proceder à análise, inicialmente foram feitos os mapas de aula das duas aulas consecutivas, nas quais foram realizadas as atividades em grupos, em que se tratou do tema “o argumento da queda da lua e a síntese newtoniana”. Conforme consta nos mapas de aula, foram formados 6 grupos de 5 alunos na 1ª aula e 5 grupos de 4 alunos na 2ª aula. Como instrumento da análise, foi utilizada a estrutura de Toulmin dos argumentos. Esta estrutura permite distinguir em uma argumentação, além dos **dados e conclusões**, **garantias** (ou justificativas) e também os **fundamentos**, **refutadores** e **qualificadores** que, segundo Toulmin, constituem os elementos de uma argumentação. Uma vantagem de escolher este instrumento, além das suas qualidades teóricas já apresentadas aqui, é o fato de já ter sido amplamente validado em diversas pesquisas (Abi-El-Mona e Abd-El-Khalick, 2006; Erduran et al., 2004; Albe, 2008; Munford e Zembal-Saul, 2002; Jiménez-Aleixandre et al., 2000_{a,b}; Brown, 2007; Krummheuer, 2007).

A análise dos resultados foi orientada para responder às seguintes questões de pesquisa:

1. Com que qualidade os alunos argumentam sobre o tema ‘síntese newtoniana’?
2. Qual o papel da atividade em grupo e do texto usado nesta atividade, na construção da argumentação dos alunos sobre o referido tema?

Como forma de validação das análises foi feita uma estratégia de triangulação. Em primeiro momento os dados, após serem transformados e identificados os episódios de ensino (apresentados nas tabelas em anexo), foram analisados por dois dos autores individualmente e, em seguida, coletivamente, com a participação também de um terceiro autor. As poucas divergências que ocorreram foram dirimidas por consenso neste momento. Por fim, os resultados analisados foram submetidos à apreciação do outro autor do trabalho.

Mapa da 1ª aula (realizada em 30/05/2007). Tema: o argumento da queda da lua e a síntese newtoniana.

Duração (h:m:s)	Atividade desenvolvida	Ações do professor e dos alunos	Comentários
Começo da aula: 20:30h. Esta parte da atividade durou cerca de 5 min.	Apresentação e esclarecimento sobre a atividade a ser desenvolvida em sala.	O professor solicita que os alunos se reúnam em grupos de 5 componentes para discutir o tema a partir do texto previamente lido e orientando-se pelos três primeiros itens do questionário para fazer uma discussão coletiva com a apresentação dos resultados de cada grupo. Os alunos se organizam em grupos.	Formaram-se 6 grupos com 5 alunos em cada grupo.
00:00:01 00:48:32	Discussão em grupos. Episódio I (entre 00:25:54 e 00:34:35)	Os alunos em grupo realizam a discussão usando o texto como base e respondendo aos três primeiros itens do questionário.	A filmagem começa a partir desta parte da atividade, sendo focado somente um dos grupos. Neste, o aluno 1 conduz inicialmente a discussão que é acompanhada pelos demais. Dois deles, pouco ou nada participam. Os dois outros (2 e 3) iniciam um debate que constitui o Episódio I .
00:48:33 01:25:32	Discussão coletiva entre os grupos mediada pelo professor. Episódio II (entre 00:49:17 e 01:14:00). Episódio III (entre 01:14:01 e 01:23:10). Episódio IV (entre 01:23:11 e 01:25:32).	O professor inicialmente solicita que se abra uma grande roda na sala e dá esclarecimentos sobre a condução da discussão coletiva. Pede que cada grupo relate os resultados da discussão (as respostas ao questionário) para que se faça uma discussão coletiva mediada pelo professor. Um-a-um, os três primeiros itens do questionário são discutidos.	A filmagem abrange toda a turma, sendo que, quando cada pessoa fala, a câmera foca nela e mais três ou quatro pessoas próximas (em geral, do mesmo grupo). Em média, dois ou três alunos falam pelo seu grupo. Os demais, ficam atentos. Os Episódios II, III e IV constam das discussões sobre os itens 1, 2 e 3, respectivamente.

01:25:33	Encerramento da atividade.	O professor encerra a atividade e prospecta a próxima atividade em que serão discutidos os três outros itens do questionário na aula seguinte.	
01:26:26			

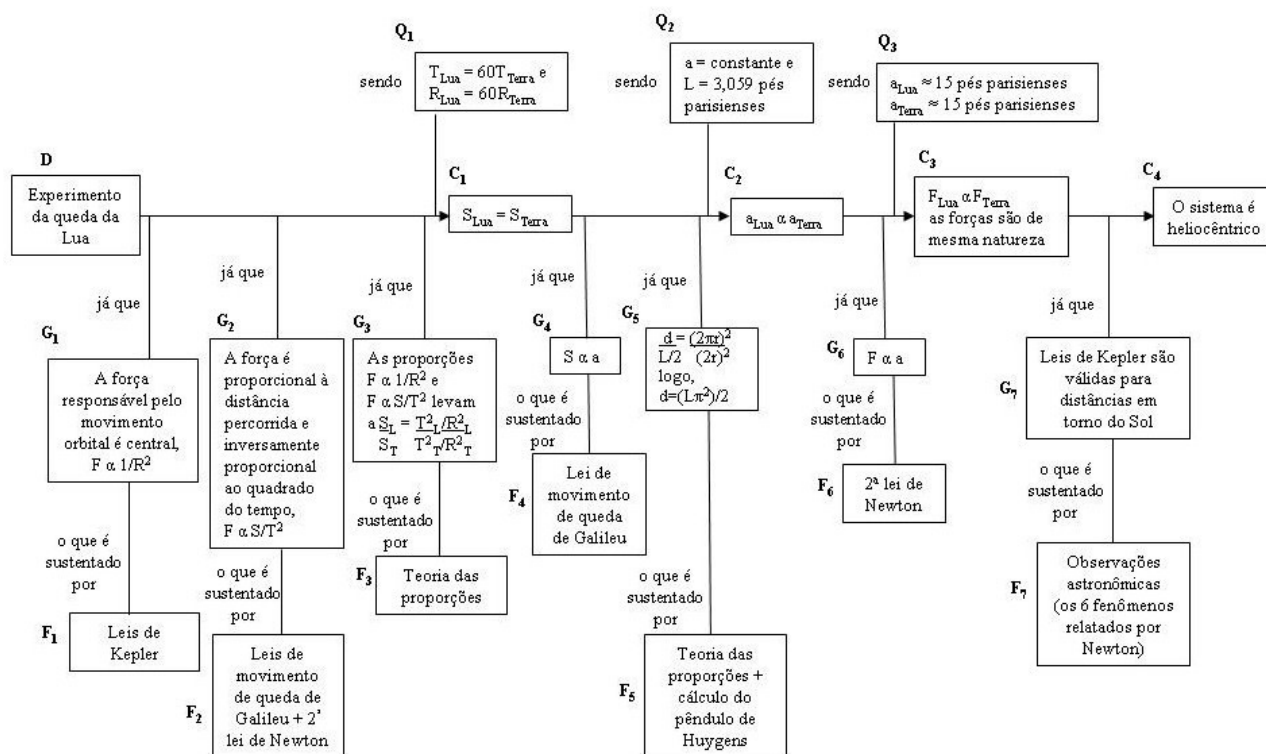
Mapa da 2ª aula (realizada em 01/06/2007). Tema: o argumento da queda da lua e a síntese newtoniana.

Duração (h:m:s)	Atividade desenvolvida	Ações do professor e dos alunos	Comentários
Começo da aula: 20:30h. Esta atividade durou cerca de 5 min.	Apresentação e esclarecimento sobre a atividade a ser desenvolvida em sala.	O professor solicita que os alunos repitam os grupos da aula anterior para discutir o tema a partir do texto lido, orientando-se pelos três últimos itens do questionário, para fazer uma discussão coletiva com a apresentação dos resultados de cada grupo. Os alunos o fazem.	Esta foi uma aula extra e houve uma pequena redução na frequência. Os grupos da aula anterior se repetiram, mas com algumas mesclas ficando 5 grupos com 4 alunos em cada grupo em média.
Cerca de 35min.	Discussão em grupos.	Os alunos realizam a discussão usando o texto como base e respondendo aos itens 4, 5 e 6 do questionário.	
00:00:01	Discussão entre os grupos mediada pelo professor. Episódio V (entre 00:00:26 e 00:24:49). Episódio VI (entre 00:24:50 e 00:32:24). Episódio VII (entre 00:32:25 e 00:39:52).	O professor, repetindo o procedimento da aula anterior, abre a discussão. Pede que cada grupo relate os resultados da discussão (as respostas aos itens 4, 5 e 6 do questionário) para a posterior discussão coletiva mediada pelo professor. Um a um, os três últimos itens do questionário são discutidos.	A gravação foi feita somente em áudio e começou a partir deste momento. O áudio-gravador é colocado próximo à quem fala. Em média, dois ou três alunos falam pelo seu grupo. Os demais, atentos. Os Episódios V, VI e VII constam das discussões sobre os itens 4, 5 e 6, respectivamente.
00:39:52			
00:39:53	Discussão geral sobre problemas do ensino de Física	O professor, ao encerrar a discussão referente ao Episódio VII , comenta sobre a importância do ensino da gravitação universal. Isto gera uma discussão com os alunos sobre problemas no ensino de Física em geral.	Esta parte da atividade não foi planejada, ocorrendo espontaneamente e, embora relevante, não é objeto de análise neste trabalho, pois não faz parte das questões de pesquisa aqui propostas.
00:51:46			
00:51:47	Encerramento da atividade.	O professor encerra a atividade e marca a entrega da demonstração da força centrípeta.	Esta demonstração conta como avaliação da disciplina.
00:51:58			

Análises

A seguir, serão apresentadas as análises dos episódios, referentes à qualidade da argumentação gerada pelas discussões em grupos e entre os grupos com mediação do professor. Os referidos episódios, contendo os turnos de fala, encontram-se em anexo. Após a análise de cada episódio são apresentados os esquemas representativos dos argumentos construídos coletivamente, conforme o modelo de Toulmin (Toulmin, 1958/2006). Este modelo será utilizado como instrumento referência para análise da qualidade da argumentação. Assim, será assumida como qualidade da argumentação a correspondência entre a estrutura dos argumentos dos alunos conforme analisada pelos pesquisadores e o modelo teórico de Toulmin.

Antes, porém, é apresentada abaixo uma representação do esquema de Toulmin referente à argumentação dos pesquisadores, autores deste trabalho, sobre o tema das atividades relatadas nesta investigação (“O argumento da queda da Lua e a síntese newtoniana”), argumentação esta, que foi baseada na leitura feita pelos pesquisadores do texto (Freire, Matos e Valle, 2004) usado em tais atividades. Esta representação foi construída a partir de discussões entre os pesquisadores e tem a finalidade de auxiliar, através de comparação, na avaliação dos argumentos construídos coletivamente em cada episódio de ensino analisado. Como se trata de uma representação, que sempre tem um viés interpretativo, não tem a pretensão de ser única, exaustiva, definitiva nem exata, mas apenas um instrumento a mais para auxiliar os autores no processo de análise.



Esquema de Toulmin para a argumentação dos autores referente ao tema "O argumento da queda da Lua e a síntese newtoniana", baseada no texto de FREIRE, MATOS e VALLE (2004).

Para aclarar mais esta representação, pode-se tomar como exemplo o primeiro trecho do argumento que corresponde à primeira conclusão de Newton na explanação da Proposição IV, a saber: partindo da experiência mental de que a Lua, subitamente destituída de seu movimento tangencial em torno da Terra, cai em direção a esta, pode-se concluir que a distância de queda da Lua à altura de sua órbita em um minuto é igual à distância de queda da Lua à altura de um raio da Terra em um segundo. Três garantias permitem esta passagem (do dado **D**, à conclusão **C₁**): (i) a assunção hipotética de que a força que mantém o movimento orbital da Lua em torno da Terra é central, o que significa que esta força é inversamente proporcional ao quadrado da distância, podendo ser expressa na forma $F \propto 1/R^2$. As três leis planetárias de Kepler dão sustentação a esta hipótese; (ii) a afirmativa de que esta força é proporcional à distância e inversamente proporcional ao quadrado do tempo, o que pode ser expresso na forma $F \propto S/T^2$. A lei de movimento de queda de Galileu e a segunda lei de Newton dão fundamentação a esta afirmativa; (iii) o resultado de que as proporções anteriores levam à expressão $S_L/S_T = T_L^2/R_L^2/T_T^2/R_T^2$, o que é permitido deduzir pela teoria das proporções. Por fim, a conclusão é validada ainda pela condição de que o tempo de queda da Lua a partir de sua órbita (1 minuto) é igual a sessenta vezes o tempo de queda da Lua à distância de um raio terrestre (1 segundo) e o raio da órbita da Lua em relação à Terra é, coincidentemente, também sessenta vezes o raio da Terra. Esta coincidência ajudou Newton a fazer os cálculos que o conduziram à conclusão **C₁**.

Discussão interna de um dos grupos sobre os três primeiros itens do questionário

Conforme consta no mapa da 1ª aula, antes das discussões entre os grupos com mediação do professor ocorreu um período (cerca de 48 minutos) de discussão em grupo, no qual, os membros de cada grupo puderam debater internamente sobre o tema da aula, a partir do texto lido (Freire, Matos e Valle, 2004), sendo orientados pelos três primeiros itens do questionário. O Episódio I (tabela em anexo) foi extraído de um trecho da discussão interna que ocorreu em um dos grupos (o que foi filmado) e durou 8 minutos e 41 segundos. Dos cinco alunos que compunham o grupo, dois deles (A22 e A23) praticamente não participaram da discussão tomando uma posição de espectadores no grupo; um deles (A1) assumiu espontaneamente a postura de líder do grupo tomando a frente da

condução das discussões; fazendo anotações para a apresentação do relato do grupo à turma, quando da discussão entre os grupos; lendo em voz alta trechos do texto quando a discussão requisitava; e explicando o assunto aos demais. Quando lhe faltava a compreensão de alguma parte do assunto, este aluno assumia isto para o grupo e solicitava ajuda. Durante a discussão entre os grupos, A1 foi também quem mais falou pelo seu grupo, embora não tivesse sido o único. Os dois outros membros (A2 e A21) assumiram espontaneamente a postura de ajudantes de A1, auxiliando-o nas explicações através de breves comentários, sobretudo quando este solicitava por não ter compreendido bem algum aspecto do assunto.

O aluno A1 inicia a discussão explicando o Passo 1⁶ do texto (ver Freire, Matos e Valle, 2004) se apoiando no mesmo, enquanto que os demais somente escutam, com exceção de A21 que faz um breve comentário auxiliando A1 na explicação. O aluno A1 segue para o Passo 2 quando, ao demonstrar pouco entendimento, A2 interfere fazendo uma síntese de como achar a aceleração a partir dos dados encontrados no texto. Há uma ligeira discordância entre A1 e A2, quando o aluno A21 intervém em favor de A1 e chegam a um consenso. Após um breve tempo de dispersão, passam a conferir os cálculos que já tinham feito. O aluno A22, então, solicita a A1 uma nova explicação do Passo 1, pois não havia compreendido. A explicação é feita por A1 com mais cuidado e apoiada no texto, enquanto os outros observam com atenção. Daí, se voltam novamente para o Passo 2 com A1 lendo o texto e tentando reconstruir as contas do mesmo.

Percebeu-se que os alunos estavam, na maior parte da discussão, mais preocupados com a compreensão dos 3 Passos do texto, do que com a solução dos itens do questionário. Somente aos doze minutos de discussão, A1 solicita e lê em voz alta o segundo item do questionário, que é discutido com uma pequena divergência inicial, mas resolvida por consenso. Por volta dos 18 minutos, A21 e, em seguida, A2 fazem leitura em voz alta do primeiro item e passam a discuti-lo. Conjuntamente, estes dois alunos respondem à questão complementando suas respostas. Após um período de conversas fora do assunto, o aluno A1 retoma suas contas revelando ter dificuldades de colocar no texto o relato com as respostas do grupo, bem como, dificuldades de compreensão com o Passo 2 em função da linguagem do texto neste trecho. Num determinado momento, mostra ter um ‘*insight*’ para uma dúvida, expõe para o grupo e pede confirmação dos ‘ajudantes’ A2 e A21, que o fazem. Retoma o texto e todos voltam à leitura silenciosa: A22 e A23 conjuntamente, A2 e A21 idem e A1 sozinho. A2 demonstra ter um entendimento do Passo 2 e passa a explicar a A21, que mostra dúvidas. Nesse instante, próximo aos 26 minutos, inicia-se uma divergência de compreensão e um debate entre A2 e A21, relativa ao Passo 2. Este foi o principal conflito que ocorreu na discussão deste grupo e, por isso, constituiu o Episódio I (discutido com mais detalhes adiante). Curiosamente, neste Episódio os alunos A2 e A21 polarizam a discussão e A1 tem pouca participação, diferentemente do que vinha acontecendo até este momento. Ao final deste Episódio – resolvido por consenso – e após alguns minutos de conversas paralelas (neste tempo, somente A1 fica lendo o texto em silêncio), A1 chama o grupo para discussão do Passo 3, demonstrando dificuldades com o mesmo. Voltam a ler em silêncio e aos pares, com A1 sozinho. Após um tempo, A1 passa a ler o texto para o grupo, fazendo anotações e revelando que não compreendeu. Em seguida, após pouco mais de 48 minutos, o professor encerra esta parte da atividade e convoca os alunos a re-arrumarem a sala em ‘grande roda’ para a discussão coletiva.

⁶ Trata-se dos passos que Newton segue no texto: Passo 1 - sem recorrer à expressão algébrica da aceleração, Newton calculou a distância que a Lua cairia em direção à Terra no tempo de 1 minuto, caso fosse privada de seu movimento tangencial; Passo 2 - assumindo que a força entre a Lua e a Terra é inversamente proporcional ao quadrado da distância, Newton define S_L e S_T e utilizando a proporcionalidade $S \propto T^2/R^2$, conclui que $S_L = S_T$; Passo 3 - recorrendo ao pêndulo de Huygens, Newton calcula a distância S_T e encontra um valor concordante com a conclusão do passo 2.

Episódio I – O significado das distâncias S_L e S_T^7

O aluno A2 inicia a discussão explicando que o objetivo do Passo 2 é provar que $S_L = S_T$. No seu argumento, parece não ter compreendido o significado das distâncias S_L e S_T , uma vez que não inclui a redução do tempo feita por Newton, de um minuto para um segundo (ver nota de rodapé 7). Este aluno confunde esta redução com uma simples transformação de unidades de um minuto para sessenta segundos, como forma de justificar a simplificação que Newton fez nos cálculos. O aluno A21 discorda de A2 e mostra ter compreendido o significado das distâncias e a redução feita, portanto, diferentemente de A2, parece ter entendido o Passo 2. Entretanto, o aluno A21 não percebeu no texto que o tempo estava elevado ao quadrado, não conseguindo justificar a simplificação, tendo sido auxiliado por A2. No final do episódio, ambos concordam e chegam a um consenso sobre como foi efetuada a simplificação. A postura dos dois alunos neste episódio foi colaborativa resolvendo o conflito por consenso, havendo também uma atitude de ajuda mútua para a compreensão do texto.

Notou-se, na discussão interna deste grupo, uma atitude colaborativa por parte dos estudantes envolvidos na discussão, visto que, os dois alunos que assumiram o papel de ajudantes, o fizeram para contribuir com a discussão, auxiliar nas explicações para o entendimento dos demais e apoiar o que assumiu o papel de líder. Este, por sua vez, embora tenha adotado tal função, não o fez com autoritarismo, assumindo as dificuldades de entendimento e solicitando ajuda quando diante das mesmas. Por fim, mesmo quando ocorreu o maior conflito, registrado no Episódio I, a solução ocorreu por consenso mostrando uma atitude colaborativa do grupo. Assim, o tipo de interação (neste caso, colaborativa) entre os estudantes de um grupo parece interferir no processo de elaboração do argumento, resultado similar foi encontrado por Albe (2008). Vale esclarecer, que as posturas adotadas espontaneamente pelos membros do grupo (líder, ajudantes e espectadores) não foram assumidas explicitamente por eles, mas foram detectadas pelos pesquisadores no processo de análise do vídeo e da sua transcrição.

Discussão entre os grupos

Episódio II – Como Newton comparou a aceleração da Lua em sua órbita com a aceleração da gravidade na superfície da Terra? Quais os artifícios que ele utilizou para isso?

Na discussão do Episódio II (tabela em anexo) o primeiro grupo, através do aluno A1, esboça uma resposta, mesmo de forma incompleta e um tanto confusa, argumentando que Newton se volta para a geometria (o que pode ser interpretado como uma **garantia**) para descrever a idealizada queda da Lua. O argumento do aluno é que Newton usa a relação de proporcionalidade $F \propto S/T^2$ para chegar, na forma de **conclusão**, à expressão da aceleração. O aluno A2, complementando a resposta, cita a relação $F \propto 1/R^2$ como um **dado** que Newton usou para chegar à **conclusão** de que as acelerações a_{Lua} e a_{Terra} (respectivamente, a aceleração centrípeta da Lua e a aceleração na superfície da Terra) são proporcionais. O aluno fala sobre a redução do tempo de queda da Lua (de um minuto para um segundo) como quem usa um **qualificador**, como uma condição específica que Newton impôs artificialmente para chegar à conclusão de que as acelerações são proporcionais. O professor avaliou sucintamente como boa, a resposta, numa interação do tipo I-R-A.

O segundo grupo concorda com a resposta do grupo anterior complementando-a com uma explicação sobre o artifício de Newton em usar o tempo de 60 segundos, como o tempo de queda, para facilitar os cálculos, visto que 60 é também o número de vezes o raio da Terra que corresponde

⁷ S_L e S_T são, respectivamente, a distância de queda da Lua à altura de sua órbita **em um minuto** e a distância de queda da Lua à altura de um raio da Terra **em um segundo**, no experimento idealizado da ‘queda da Lua’ de Newton, conforme encontrado em Freire, Matos e Valle (2004).

à distância da Terra à Lua. Conforme assumido por Newton em seu experimento, no momento de estabelecer a razão T^2/R^2 (onde, T é o tempo de queda da Lua a partir da altura de sua órbita e R a distância da órbita da Lua em relação à Terra) fica fácil a simplificação dividindo-se o numerador e o denominador por 60. O aluno A8 chega a afirmar que a relação entre as distâncias de queda da Lua na órbita em um minuto e na superfície da Terra em um segundo (S_L e S_T), bem como, os raios da órbita da Lua e da Terra (R_L e R_T) – que não tinha sido citada claramente pelo grupo anterior – levam à **conclusão** de que $F \propto 1/T^2$. A conclusão do aluno não está correta, pois esta proporcionalidade não existe, e mesmo que ele estivesse querendo se referir à $F \propto S/T^2$, que aparece no texto, esta é obtida a partir da lei da queda livre de Galileu conjuntamente com a segunda lei de Newton. A relação $R_L = 60R_T$ é uma condição específica que leva à proporcionalidade entre as acelerações e não conduz à proporção referida pelo aluno. Aqui, a interação também foi do tipo I-R-A.

A terceira equipe trás a discussão sobre a simplificação feita devido essa transformação de minuto para segundo e a semelhança entre as relações ($1\text{min} = 60\text{s}$ e $R_L = 60 R_T$). O aluno A14 argumenta que o fato da proporção $1\text{min}/60\text{s}$ ser a mesma para o raio da Terra/órbita da Lua (o que serviu como um elemento simplificador nos cálculos de Newton) tratou-se de uma coincidência que, caso não ocorresse (**refutador**) Newton não chegaria à **conclusão** (de que $S_L = S_T$).

O professor mantém a palavra com o terceiro grupo e o aluno A10 lança o argumento das proporcionalidades $F \propto 1/R^2$ e $F \propto S/T^2$ como **garantias** que justificam a conclusão de que a distância de queda da Lua em um minuto na sua órbita é igual à distância de queda da Lua na superfície da Terra em um segundo. O professor, ao avaliar as respostas, salienta que, até então, os grupos deram duas respostas distintas para a questão da simplificação acima referida: uma delas atribui a uma coincidência numérica da proporcionalidade $R_{\text{Terra}}/R_{\text{Lua}} : 1/60$; a outra, afirma que a simplificação depende de Newton ter adotado as proporcionalidades $F \propto 1/R^2$ e $F \propto S/T^2$. As duas respostas estão corretas e são complementares, posto que de fato existe a coincidência e, para fazer a simplificação, Newton usou as proporções acima. A interação que ocorreu foi do tipo I-R-P-R-A.

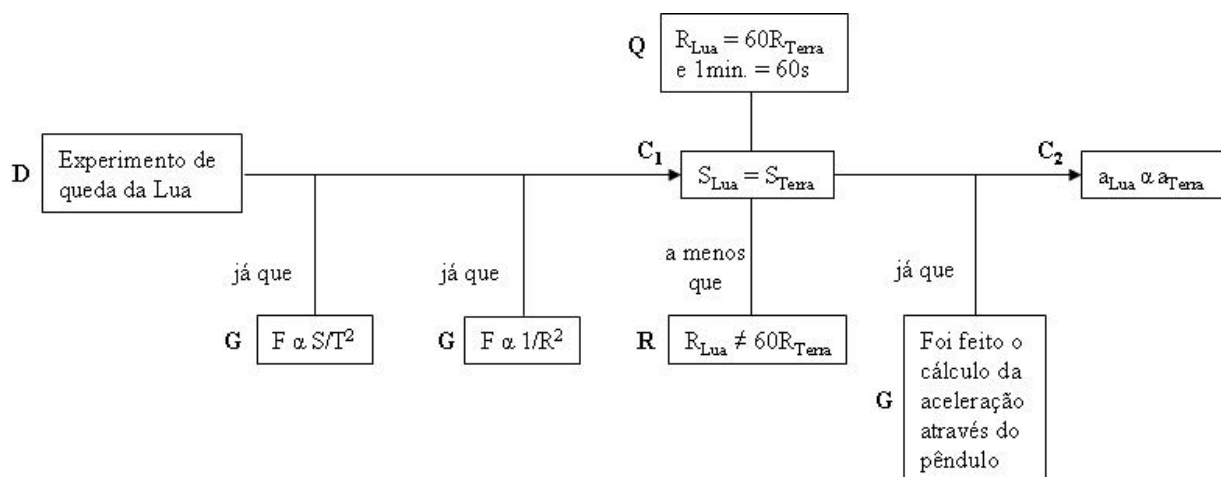
A quarta equipe foi a primeira a citar a utilização do pêndulo de Huygens para a obtenção da aceleração da gravidade na superfície da Terra. Considerando que esse passo é fundamental para a comparação entre as acelerações da Lua na altura da órbita e na superfície da Terra, vê-se que as respostas das equipes anteriores ficaram incompletas. O aluno A15 se refere a como Newton obteve a aceleração na superfície da Terra, com a utilização do pêndulo de Huygens como mais uma **garantia** para fazer a comparação, na suposta experiência da queda da Lua. O professor, ao dar um “feedback”, chama atenção para o fato de só uma equipe ter feito referência ao papel do pêndulo de Huygens no cálculo do valor da gravidade. Vale salientar que o cálculo da aceleração gravitacional de um corpo na superfície da Terra fora feita, pela primeira vez de maneira precisa, por Huygens através do pêndulo, portanto era o mais confiável da época, daí, a sua utilização por Newton. A interação que ocorreu foi do tipo I-R-F-R-A.

No grupo seguinte, o aluno A16 faz um discurso bem elaborado no qual apresenta o argumento de que a proporção $R_{\text{Terra}}/R_{\text{Lua}} : 1/60$ leva à **conclusão** de que as acelerações a_{Lua} e a_{Terra} são proporcionais. O mesmo aluno assume esta **conclusão** como um **dado** para se chegar a uma outra **conclusão**: a de que F_{Lua} é a mesma F_{Terra} . Em seguida, o aluno põe como argumento **refutador** que caso estas forças não fossem a mesma, deveria haver uma outra atuando sobre a Lua além da gravitacional, entretanto, não há evidência alguma da existência de tal força. Ainda, no mesmo grupo, o aluno A6 faz uma argumentação de forma mais elaborada que é nitidamente embasada no texto e em discussões anteriores, conforme se pode verificar nos grifos do turno 16 (em um momento o aluno se refere ao texto para construir seu argumento e, em outro, cita explicitamente falas anteriores feitas pelo professor). O aluno apresenta a **conclusão** de que a causa que faz com que os corpos caiam na superfície da Terra é a mesma que mantém a Lua em sua

órbita, dizendo que se não se tratasse da mesma causa, os resultados não concordariam com os cálculos nem com a experiência (retomando o argumento **refutador** do aluno A16).

O professor faz uma avaliação mais detalhada da discussão dos grupos, mostrando que as respostas dos primeiros grupos estavam incompletas, pois não se referiam ao valor da aceleração aqui na Terra, encontrado com o auxílio do pêndulo de Huygens. Mas, no decorrer da discussão, as outras equipes complementaram as respostas e ele avalia de forma satisfatória a resposta da turma. Em seguida, reforça a resposta dando um “feedback” e comenta sobre a questão da coincidência numérica (que dominou boa parte da discussão) enfatizando que, mesmo que não houvesse essa coincidência, Newton obteria o mesmo resultado, com um pouco mais de trabalho. A interação foi do tipo I-R-A.

Comparando o esquema abaixo com o dos autores, nota-se que a argumentação construída coletivamente neste Episódio concorda em grande parte com aquela, pois apresenta corretamente duas das garantias e um qualificador, também apresentado por aqueles, chegando à mesma conclusão C_1 . Apresenta também a garantia que leva corretamente à conclusão C_2 , embora no esquema dos autores isto esteja detalhado em dois componentes garantia e fundamento. Entretanto, esta argumentação diminui sua qualidade por não apresentar nenhum fundamento, além de faltar duas garantias (G_3 e G_4 , no esquema dos autores) e o qualificador relativo à C_2 .



Esquema de Toulmin para a argumentação construída coletivamente referente ao Episódio II

No Episódio III, “Que argumentos Newton utilizou para justificar a adoção de uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância?”, não foram encontrados elementos suficientes para se fazer uma análise dos argumentos, ao menos segundo o modelo de Toulmin, por este motivo este Episódio foi excluído da presente análise.

Episódio IV – Qual o principal obstáculo enfrentado por Newton para introduzir a idéia de uma força gravitacional de ação à distância? Que saída ele encontrou para minimizar o problema?

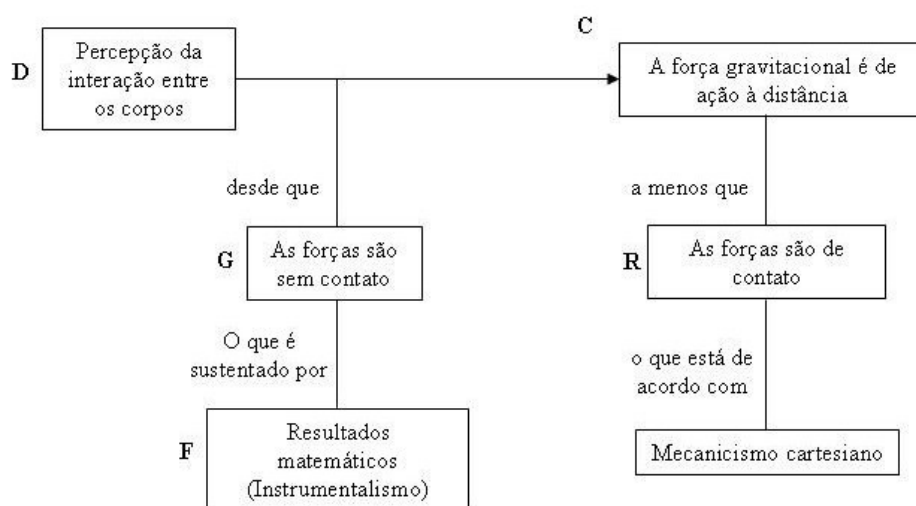
No Episódio IV (tabela em anexo) o aluno A12 usa um argumento competente⁸ de que o principal obstáculo enfrentado por Newton para introduzir a idéia de ação à distância era propor a existência de uma força que atua sem contato entre os corpos em interação, o que encontrou forte oposição por parte dos seus adversários. Sabe-se que as tradições de sua época (mecanicismo cartesiano), só admitiam a possibilidade de forças mecânicas atuando através de contato entre os corpos. O argumento do aluno pontua, ainda, que a estratégia adotada por Newton para superar as

⁸ O termo competente é empregado aqui no sentido de concordância com o argumento do texto, conforme entendimento dos pesquisadores.

críticas dos mecanicistas cartesianos foi se apoiar na força dos resultados matemáticos que davam sustentação à sua idéia, em vez de tentar encontrar evidências empíricas da ação à distância, assumindo, assim, uma postura instrumentalista. O aluno A11, ao citar explicitamente “mecanicistas e instrumentalistas”, parece demonstrar um entendimento conceitual destes termos, visto que discussões explícitas sobre estes conceitos epistemológicos haviam sido feitas em aulas anteriores e o aluno fez uso apropriado dos mesmos para avaliar a conduta de Newton e de seus adversários. A interação que ocorreu foi do tipo I-R-A.

O professor dá-se por satisfeito com os argumentos dos alunos avaliando a resposta como perfeita e faz um comentário adicional sobre a dificuldade de Newton frente ao debate com os cartesianos (mecanicistas), citando a sua famosa frase “não faço hipóteses”, como justificativa para a sua atitude instrumentalista. Com esta frase Newton queria dizer que a idéia de ação à distância (força sem contato) não era uma hipótese que ele estava supondo para ser testada empiricamente, e sim uma idéia que tinha forte sustentação matemática, logo deveria ser aceita.

Desta forma, pode se avaliar, usando os termos da estrutura de Toulmin, que o argumento construído pelos alunos e professor aponta para o entendimento de que a **conclusão** de Newton de que a força gravitacional é de ação à distância, é **garantida** pela idéia de força sem contato, o que, por sua vez, tem **fundamentação** nos resultados matemáticos sem apelo às provas empíricas (postura instrumentalista). Por outro lado, parece ter havido o entendimento também de que tal **conclusão** estava sendo **refutada** pelos mecanicistas cartesianos que acreditavam que as forças mecânicas eram de contato.



Esquema de Toulmin para a argumentação construída coletivamente referente ao Episódio IV.

Episódio V - O que você entende por síntese newtoniana? Qual a importância e implicações dessa síntese?

Pode-se perceber no Episódio V (tabela em anexo) que o primeiro grupo apresenta uma boa argumentação resumindo o que se entende por síntese newtoniana, sem apresentar incorreções. O aluno A4 usa o argumento da força centrípeta, que gera órbita elíptica dos planetas em torno do Sol, ser de mesma natureza da força que atrai os corpos na superfície terrestre, como **garantia** para o estudo conjunto das físicas celeste e terrestre. Contudo, o argumento não pontua a importância nem as implicações dessa síntese, mostrando-se, portanto, incompleto. No discurso do aluno A4, representando seu grupo, também não aparece nenhuma indicação direta de relação entre o próprio argumento e o texto usado na atividade. A interação manifestada foi do tipo I-R-A.

No grupo seguinte a resposta foi manifestada por três dos seus membros. O primeiro apenas corrobora o argumento da equipe anterior e os demais complementam a resposta com uma argumentação correta, apontando uma das implicações da síntese: a ruptura com o pensamento mecanicista de que as forças atuam por contato. O aluno A6 usa um argumento **refutador**: forças sobre os corpos celestes e terrestres tendo naturezas diferentes eliminam a idéia de que os movimentos tenham a mesma natureza. Aparece aqui, nos trechos sublinhados do turno 05, menções diretas ao texto, manifestadas pelo experimento de queda da Lua e pela concepção mecanicista, na construção do argumento do aluno A6. A interação foi do tipo I-R-A.

Os dois grupos seguintes simplesmente corroboram o que já foi dito pelos grupos anteriores usando argumentações, embora sem incorreções, excessivamente genéricas e sumárias. Interações do tipo I-R-P-R e I-R.

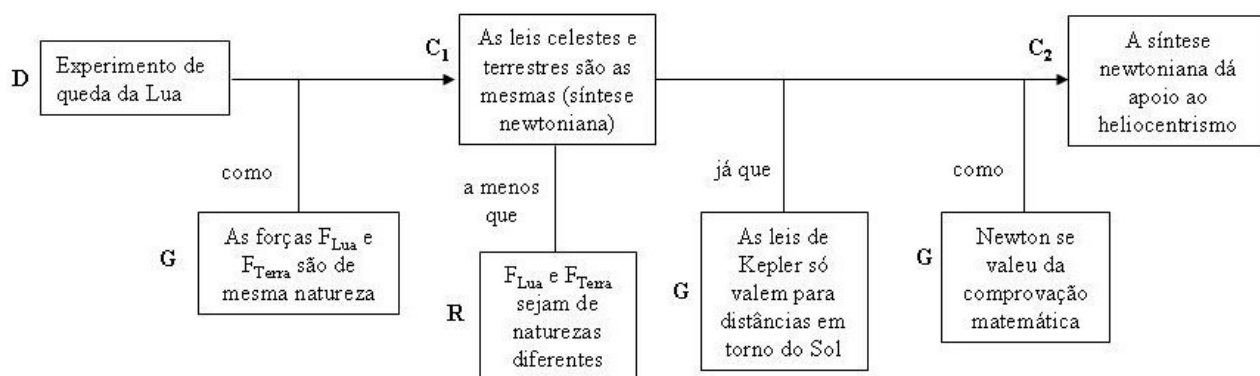
O último grupo apresenta uma argumentação também competente e reforça o argumento do segundo grupo quanto ao papel da síntese newtoniana na ruptura com a idéia de força de contato e acrescenta, à argumentação geral coletiva, a importância da síntese newtoniana como apoio ao heliocentrismo. Usa o argumento da comprovação matemática como **garantia** para o apoio da síntese newtoniana ao heliocentrismo. No trecho sublinhado do turno 16 nota-se uma influência direta do texto na construção da argumentação do aluno A11, ao fazer menção ao papel do trabalho de Kepler na síntese newtoniana conforme consta no texto. O aluno aponta, na sua argumentação, o fato de que o movimento dos planetas somente obedece às leis de Kepler se forem tomadas as distâncias dos planetas em relação ao Sol, como **garantia** da síntese newtoniana para o apoio ao heliocentrismo. Interação do tipo I-R-A.

Assim, os alunos constroem a argumentação de que o fato da força centrípeta nos planetas ser de mesma natureza da força na superfície terrestre, ao tempo em que **refuta** a idéia de que os movimentos dos corpos celestes são diferentes, em natureza, do movimento dos corpos na Terra (idéia herdada do pensamento aristotélico), **garante** o estudo conjunto das físicas celeste e terrestre, o que constitui o que se chama de síntese newtoniana. Por sua vez, essa síntese tem duas implicações: (i) apoio ao modelo heliocêntrico, ao mesmo tempo em que rompe com o modelo geocêntrico, o que é **garantido** por comprovações matemáticas e pela evidência de que o movimento dos planetas em torno do Sol está em acordo nas leis de Kepler, o que não ocorre com o movimento dos planetas em torno da Terra; (ii) ruptura com a idéia de que as forças somente atuam quando em contato com os corpos (idéia própria do mecanicismo vigente na época de Newton), conforme igualmente encontrado em Freire, Matos e Valle (2004).

Ao final, o professor faz uma síntese das contribuições dos grupos dando-se por satisfeito com o argumento coletivo. Percebe-se, assim, o papel das contribuições de cada grupo em que as informações vão se agregando na construção de um discurso coletivo competente. Percebe-se também que os argumentos mais consistentes estavam embasados no texto, o que reforça também o papel deste na construção do discurso (vide turnos 05 e 16). Chama-se atenção para o fato de que a interação em que ocorreu a cadeia mais prolongada foi com um dos grupos que deram menor contribuição na construção da argumentação geral (vide turnos 08 a 11).

Ao comparar o esquema abaixo com o dos autores, nota-se uma diferença na forma como a argumentação foi construída. A interpretação dos autores é que a conclusão a que Newton chega, segundo o texto, é que as forças F_{Lua} e F_{Terra} são proporcionais (C_3), logo são de mesma natureza, o que é garantido pela proporção $F \propto a$, sustentada pela 2ª lei de Newton; por sua vez, o esquema abaixo apresenta a idéia de que tais forças são proporcionais como garantia para a conclusão de que as leis de movimento celestes e terrestres são as mesmas. Esta diferença não significa uma incorreção, mas formas distintas de argumentar corretamente este trecho. No segundo trecho da argumentação, a garantia apresentada aqui confere com a dos autores (G_7), levando à mesma

conclusão. Contudo, no esquema abaixo, igualmente não aparecem os fundamentos nem o qualificador (Q_3), tornando esta argumentação incompleta do ponto de vista do modelo de Toulmin.



Esquema de Toulmin para a argumentação construída coletivamente referente ao Episódio V

Episódio VI - Que argumentos Newton utiliza para adotar o sistema heliocêntrico?

No Episódio VI (tabela em anexo) pode-se perceber que o argumento do aluno A1, embora não apresente incorreções, está incompleto, pois apenas cita o uso que Newton faz das leis de Kepler que, para serem válidas, dependem de que a força seja central. O aluno faz menção direta ao texto e aponta a interdependência entre leis de Kepler e força central como **garantia** para adoção do sistema heliocêntrico por Newton. Uma complementação é feita pelo aluno A2, do mesmo grupo, que corrobora o argumento de A1 colocando que se o sistema fosse geocêntrico, a interdependência entre as leis de Kepler e a força central não se verificaria. A interação existente é do tipo I-R.

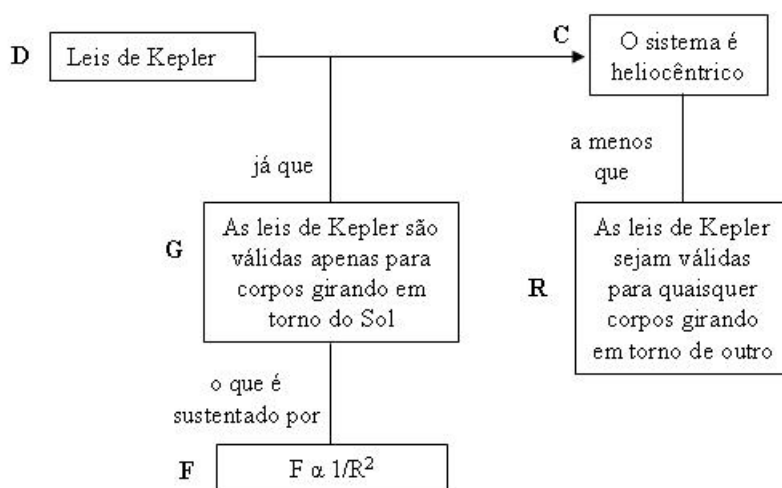
O segundo grupo concorda com os argumentos do primeiro, mas sem acrescentar algo relevante à argumentação coletiva apesar da interação ser do tipo I-R-P-R-A (por esta razão, estes turnos foram suprimidos da tabela). Em seguida houve uma discussão com a participação não somente dos dois grupos restantes, mas também do segundo grupo que, inicialmente não tinha acrescentado nada relevante e passou a contribuir significativamente, gerando uma longa cadeia de interação do tipo I-R-P-R-P-R-A.

O aluno A11 (turno 08) especifica, com embasamento no texto, a 3ª lei de Kepler como **garantia** para o sistema heliocêntrico. O aluno A4 complementa o argumento, embasando-se no texto, usando a força central do tipo $1/R^2$ como **fundamento** de que a 1ª lei de Kepler é válida, ou seja, que corpos orbitando em trajetórias elípticas (1ª lei) são agidos por uma força central (do tipo $1/R^2$), citando que Newton já havia comprovado isto no Livro I dos '*Principia*'. Assim, os grupos estão se baseando nas leis de Kepler, uma vez que fossem tomadas as distâncias dos planetas em relação ao Sol, como **garantias** para a adoção do sistema heliocêntrico por Newton e tomando a hipótese deste (de que a força que mantém os planetas em órbita é do tipo $1/R^2$) como **fundamento** para sustentar o uso das leis de Kepler.

Foi ainda apresentado um argumento **refutador**. O aluno A13 argumenta que, na época de Newton, não havia razões para se crer que as leis de Kepler valessem somente para planetas em torno do Sol, mas para qualquer corpo girando em torno de outro, por isso não se pode dizer que se tratava de prova irrefutável a favor do heliocentrismo. De fato, as leis de Kepler valem para quaisquer corpos orbitando em torno de outro, mas o argumento de Newton era de que os fenômenos observáveis mostravam que as trajetórias planetárias somente correspondiam às leis de Kepler, tomando-se as distâncias dos planetas ao Sol e não correspondiam a tais leis quando se tomava a distância em relação à Terra, o que corroborava assim o modelo heliocêntrico (Freire, Matos e Valle, 2004). O argumento de Newton não foi percebido pelo aluno. Ainda assim, por levantar razões históricas, o argumento do aluno foi considerado pelo professor ao se reportar, no

seu discurso final (turno 12), à possibilidade da argumentação não ser caracterizada como prova irrefutável em função de que, na época, poderia haver a adoção de outro modelo, que não o heliocêntrico, que também se ajustasse às leis de Kepler. Assim, o professor contempla a argumentação do aluno como sendo plausível por razões de natureza histórica. Novamente aqui, percebe-se o papel das contribuições de cada grupo ao agregar novos discursos na construção de um argumento coletivo. Percebe-se igualmente a conexão entre os argumentos mais consistentes e os respectivos embasamentos no texto.

Fazendo uma comparação com o esquema dos autores, nota-se que a argumentação construída aqui, representada no esquema abaixo, apresenta uma garantia que está de acordo com a dos autores (G₇) para chegar à mesma conclusão. Entretanto, Newton sustenta a idéia de que as leis de Kepler são válidas para corpos girando em torno do Sol, nas observações planetárias (os seis fenômenos descritos por ele) e não na proporção $F \propto 1/R^2$. Na verdade, a idéia de que a força é inversamente proporcional ao quadrado da distância, como proposto por Newton, é fundamentada nas leis de Kepler, que já eram bem aceitas na época (ver primeiro trecho do esquema dos autores) e não o contrário, como sugere o esquema abaixo.



Esquema de Toulmin para a argumentação construída coletivamente referente ao Episódio VI

Episódio VII - Que conclusões você chega sobre o trabalho de Newton depois da leitura do artigo e da atividade em classe?

Conforme Abi-El-Mona e Abd-El-Khalick (2006), Munford e Zembal-Saul (2002), bem como Jiménez-Aleixandre et al. (2000_{a,b}), um dos benefícios da estratégia de ensino de ciências focada no desenvolvimento da argumentação é propiciar aos estudantes a oportunidade deles aprenderem não somente o conteúdo da ciência, mas também desenvolver a capacidade de análise sobre a ciência, compreendendo esta como parte da cultura. Esta perspectiva parece sustentar, em parte, os resultados aqui encontrados, ao analisar os argumentos dos alunos no Episódio VII (tabela em anexo). Nota-se, aqui, o aparecimento, nos discursos dos alunos, de algumas visões sobre a natureza da ciência.

Por um lado, aparece uma visão tipicamente apoiada no positivismo, caracterizada pela crença na irrefutabilidade dos resultados por estarem “certos”, garantidos, uma vez demonstrados matematicamente. Aparece aí também uma visão cumulativa da ciência e a idéia do cientista “gênio” que, em função de esforço heróico, é capaz de mudar os rumos da ciência (por exemplo, turnos 06 a 08). Este tipo de visão sobre a ciência tem se mostrado muito comum entre estudantes de ciências, conforme relatado em vasta literatura sobre o assunto (Aikenhead, 1973; Lederman & O’malley, 1990; Lederman, 1992; Ryan & Aikenhead, 1992; Pomeroy, 1993; Roth & Roychondhury, 1994; Solomon et al., 1994; Abrams & Wandersee, 1995; Roth & Lucas, 1997;

Harres, 1999; Abd-El-Khalick & Lederman, 2000; Moss et al., 2001). Assim, a despeito de não terem sido investigadas as visões dos participantes sobre a ciência antes das atividades, não é surpreendente que tais concepções surgissem, sobretudo por se tratarem de estudantes recém-ingressos na Universidade.

Por outro lado, aparecem também visões mais próximas de concepções pós-positivistas (Laudan, 2003; Mcevoy, 2007 e Rosa, 2006), em que a ciência é vista como tendo natureza conjectural, sem certezas nem provas irrefutáveis e construída a partir do trabalho coletivo e não de um único “gênio”. Ao analisar a argumentação do aluno A6 (turno 10), quando se refere explicitamente ao debate que ocorreu em sala durante as atividades para relatar as visões do grupo, pode-se perceber – ao menos para uma parte da turma – os benefícios igualmente apontados por Abi-El-Mona e Abd-El-Khalick (2006), Munford e Zembal-Saul (2002) e Jiménez-Aleixandre et al. (2000_{a,b}), em termos de uma aproximação da visão destes alunos à concepções pós-positivistas. Tais benefícios podem ter sido propiciados pelas atividades desenvolvidas conjuntamente com a aposta feita na abordagem contextual implementada através do texto usado na atividade (de natureza histórica) e da estratégia usada pelo professor da disciplina, informando-a através da História e Filosofia da Ciência.

Conclusões e implicações

A análise mostra que a estrutura da argumentação de Toulmin se mostrou eficaz para analisar a qualidade da argumentação construída coletivamente em cada episódio, permitindo identificar os elementos da argumentação presentes no discurso dos alunos e, assim, avaliar em que medida estava em acordo com o argumento partilhado pela comunidade científica e presente nos textos didáticos sobre a síntese newtoniana. Os resultados apontaram que houve um papel fundamental das contribuições de cada grupo na construção de uma argumentação coletiva satisfatória, na medida em que os grupos foram gradualmente complementando o argumento coletivo com agregação de novas **garantias, fundamentos, qualificadores e refutadores**, o que acentua a importância das atividades para a construção social do conhecimento conforme também apontaram (Mortimer e Scott, 2002; Jiménez-Aleixandre et al., 2000_b; Abi-El-Mona e Abd-El-Khalick, 2006; Sutton, 2003; Driver et al., 1994; Erduran et al., 2004; Albe, 2008).

Entretanto, percebeu-se que houve uma limitação no argumento construído coletivamente pois, em geral, não eram apresentados os fundamentos para as garantias. Este resultado foi encontrado também por Krummheuer (2007) com alunos de escola primária. Os alunos somente apresentaram fundamentos em apenas dois dos episódios, sendo que um deles, referente ao Episódio IV, não está de acordo com o fundamento apresentado pelos pesquisadores. Esta ausência dos fundamentos nas argumentações dos alunos pode ser fruto de uma visão positivista sobre a ciência. A idéia dos alunos de ‘ciência baseada em certezas’ (conforme apareceu o Episódio VII, bem como em vasta literatura) e/ou sua confiança nas fórmulas matemáticas, pode ser interpretada como uma forma de compreender as garantias como pressupostos bem estabelecidos e aceitos sem necessidade de fundamentos. Entretanto, esta hipótese precisa ser melhor investigada.

Os resultados mostraram também, a importância do texto usado nas atividades para a qualidade da argumentação dos alunos, uma vez que os argumentos mais consistentes foram aqueles que estavam diretamente embasados nesse texto ou em discussões precedentes, o que aponta para um papel importante da abordagem contextual nessa argumentação. Como a discussão foi orientada por um questionário, poderia se considerar a possibilidade dos estudantes adotarem a atitude de procurar pragmaticamente no texto as respostas aos itens do questionário, em vez de fazer uma leitura mais consistente para depois responder às questões – atitude esta que é comum em estudantes de todos os níveis de ensino. Entretanto, a análise do Episódio I mostrou que os alunos do grupo filmado, estavam mais preocupados com a compreensão do texto do que em responder o

questionário. Isto contraria a possibilidade aventada acima. Além disso, o texto foi disponibilizado e lido antes das aulas, enquanto que o questionário somente foi apresentado aos estudantes no momento da atividade, portanto, sem que eles tomassem conhecimento prévio sobre o mesmo.

Percebeu-se também a possibilidade dos benefícios das atividades em propiciar uma reflexão sobre a ciência, aproximando a visão de parte dos alunos às concepções pós-positivistas. O texto usado nas atividades (de natureza histórica) e a estratégia adotada pelo professor, abordando o tema da aula através da História e Filosofia da Ciência, podem ter contribuído para o aparecimento destas concepções.

A análise mostra ainda que, através do instrumento de Mortimer e Scott (2002), foi possível fazer uma caracterização geral do conjunto dos episódios quanto ao desenvolvimento das atividades realizadas. Esta caracterização permitiu perceber mais claramente o papel do professor em promover a construção coletiva da argumentação possibilitando aos alunos “elicitare” os seus argumentos para a construção de uma explicação teórica sobre a síntese newtoniana, através de uma abordagem comunicativa que oscilava entre I/D, I/A e NI/A, com interações triádicas e não triádicas de modo que a intervenção possibilitou o compartilhamento coletivo dos constructos produzidos. Vale notar que as cadeias mais longas de interação (I-R-P-R-P... ou I-R-F-R-F...), quando ocorreram, não estavam necessariamente associadas a argumentações mais competentes e elaboradas do que quando ocorreram cadeias mais curtas (I-R-A).

Uma relevante indagação que surge deste trabalho é se há alguma relação entre a qualidade das argumentações produzidas pelos alunos coletivamente e a compreensão individual dos mesmos sobre os assuntos discutidos. Entretanto, este não foi o foco dos pesquisadores neste momento e se mostra como uma boa questão para pesquisas futuras.

Por fim, a despeito da importância de que estratégias de ensino através de argumentação sejam implementadas no ensino de ciências em todos os níveis, poucos trabalhos empíricos investigando esta temática no nível universitário têm sido relatados. Neste sentido, o presente trabalho pretende dar uma contribuição para pesquisas futuras.

Referências

- Abd-El-Khalick, F.; Lederman, N. (2000). Improving Science Teachers' Conceptions of Nature of Science: a Critical Review of the Literature. *International Journal of Science Education*, 22(7), 665-701.
- Abi-El-Mona, I.; Abd-El-Khalick, F. (2006). Argumentative Discourse in a High School Chemistry Classroom. *School Science and Mathematics*, 106(8), 349-361.
- Abrams, E.; Wandersee, J. (1995). How to Infuse Actual Scientific Research Practices into Science Classroom Instruction. *International Journal of Science Education*, 17(6), 683-694.
- Aikenhead, G. (1973). The Measurement of High School Students' Knowledge about Science and Scientists. *Science Education*, 57(4), 539-549.
- Albe, V. (2008). When Scientific Knowledge, Daily Life Experience, Epistemological and Social Considerations Intersect: Students' Argumentation in Group Discussions on a Socio-scientific Issue. *Research in Science Education*. 38(1), 67-90.
- Amaral, E.; Mortimer, E. (2006). Uma Metodologia para Análise da Dinâmica entre Zonas de um Perfil Conceitual no Discurso da Sala de Aula. In: SANTOS, F. e GRECA, I. (orgs.), *A Pesquisa em Ensino de Ciências no Brasil e suas Metodologias* (pp. 239-296). Ijuí: Ed.Unijui.

- Brown, R. (2007). Exploring the Social Positions that Students Construct within a Classroom Community of Practice. *International Journal of Educational Research*, 46(3-4), 116-128.
- Carvalho, A. (2006). Uma Metodologia de Pesquisa para Estudar os Processos de Ensino e Aprendizagem em Salas de Aula. In: SANTOS, F. e GRECA, I. (orgs.), *A Pesquisa em Ensino de Ciências no Brasil e suas Metodologias* (pp. 13-48). Ijuí: Ed.Unijuí.
- Driver, R.; Asoko, H.; Leach, J.; Mortimer, E.; Scott, P. (1994). Constructing Scientific Knowledge in the Classroom. *Educational Researcher*, 23(7), 5-12.
- Driver, R.; Newton, P.; Osborne, J. (2000). Establishing the Norms of Scientific Argumentation in Classrooms. *Science Education*, 84(3), 287-312.
- Erduran, S.; Simon, S.; Osborne, J. (2004). TAPing into Argumentation: Developments in the Application of Toulmin's Argument Pattern for Studying Science Discourse. *Science Education*, 88(6), 915-933.
- Freire, O.; Matos, M.; Valle, A. (2004). Uma Exposição Didática de Como Newton Apresentou a Força Gravitacional. *Física na Escola*, 5(1), 25-31.
- Harres, J. (1999). Uma Revisão de Pesquisas nas Concepções de Professores sobre a Natureza da Ciência e suas Implicações para o Ensino. *Investigações em Ensino de Ciências*, 4(3).
- Holton, G.; Rutherford, F.; Watson, F. (1970). *The Project Physics Course*. New York: Holt, Rinehart and Winston. Tradução portuguesa [das quatro unidades iniciais] pela Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1978.
- Jiménez-Aleixandre, M.; Muñoz, C; Cuadrado, V. (2000a). *Expertise, Argumentation and Scientific Practice: a Case Study about Environmental Education in the 11th Grade*. Paper presented at the Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching (NARST), New Orleans, L.A., April (ERIC Document Reproduction Service nº ED 439 960).
- Jiménez-Aleixandre, M.; Rodríguez, A.; Duschl, R. (2000b). "Doing the Lesson" or "Doing Science": Argument in High School Genetics. *Science Education*, 84(6), 757-792.
- Krummheuer, G. (2007). Argumentation and Participation in the Primary Mathematics Classroom: Two Episodes and Related Theoretical Abductions. *Journal of Mathematical Behavior*, 2(1), 60-82.
- Kuhn, T. S. (1957). *The Copernican Revolution; Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*. Cambridge: The Harvard University Press.
- Kuhn, T. S. (2003). *O Caminho desde A ESTRUTURA – Ensaio Filosófico, 1970-1993, com uma Entrevista Autobiográfica*. Trad. C. Mortari. São Paulo: Editora Unesp.
- Laudan, R. (2003). In: HEILBRON, J. L. (ed), *The Oxford Companion to the History of Modern Science* (pp. 670-671). New York: Oxford University Press.
- Lederman, N.; O'malley, M. (1990). Student's Perceptions of Tentativeness in Science: Development, Use and Sources of Change. *Science Education*, 74(2), 225-239.
- Lederman, N. (1992). Students' and Teachers' Conceptions of the Nature of Science: A Review of the Research. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(4), 331-359.
- Matthews, M. (1994). *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*. New York: Routledge.
- Mcevoy, J. (2007). Modernism, Postmodernism and the Historiography of Science. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 37(2), 383-408.

- Mortimer, E.; Scott, P. (2002). Atividade Discursiva nas Salas de Aula de Ciências: Uma Ferramenta Sociocultural para Analisar e Planejar o Ensino. *Investigações em Ensino de Ciências*, 7(3).
- Moss, D.; Abrams, E.; Robb, J. (2001). Examining Student Conceptions of the Nature of Science. *International Journal of Science Education*, 23(8), 771-790.
- Munford, D.; Zembal-Saul, C. (2002). *Learning Science Through Argumentation: Prospective Teachers' Experiences in an Innovative Science Course*. Paper presented at the Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching (NARST), New Orleans, L.A., April (ERIC Document Reproduction Service nº ED 465 520).
- Newton, I. (1687/1999). *The Principia – Mathematical Principles of Natural Philosophy*. A new translation by I. Bernard Cohen & Anne Whitman, preceded by A Guide to Newton's Principia by I. Bernard Cohen. University of California Press.
- Pomeroy, D. (1993). Implications of Teachers' Beliefs about the Nature of Science: Comparison of the Beliefs of Scientists, Secondary Science Teachers, and Elementary Teachers. *Science Education*, 77(3), 261-278.
- Rosa, L. (2006). *Tecnociências e Humanidades - Novos Paradigmas, Velhas Questões*. São Paulo: Paz e Terra.
- Roth, W.; Lucas, K. (1997). From "Truth" to "Invented Reality": a Discourse Analysis of High School Physics Students' Talk about Scientific Knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(2), 145-179.
- Roth, W.; Roychondhury, A. (1994). Students' Epistemologies and Views about Knowing and Learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(1), 5-30.
- Rutherford, F.; Ahlgren, A. (1995). *Ciência para Todos*. Lisboa: Gradiva [Edição americana original pela Oxford University Press, 1990].
- Ryan, A.; Aikenhead, G. (1992). Students' Preconceptions about the Epistemology of Science. *Science Education*, 76(6), 559-580.
- Solomon, J., Duveen, J.; Scott, L. (1994). Pupils' Images of Scientific Epistemology. *International Journal of Science Education*, 16(3), 361-373.
- Sonneville, M.; Fauque, D. (1997). *La gravitation*. Paris: Centre National de Documentation Pédagogique.
- Sutton, C. (2003). Los Profesores de Ciencias como Profesores de Lenguaje. *Enseñanza de las Ciencias*, 21(1), 21-25.
- Toulmin, S. (1958/2006). *Os Usos do Argumento*. Trad. Reinaldo Guarany. São Paulo: Martins Fontes.
- Toulmin, S. (1992). *Cosmopolis – The Hidden Agenda of Modernity*. Chicago: The Chicago University Press.
- Toulmin, S. (2003). Como a Razão Perdeu o seu Equilíbrio. In SANTOS, B. S. (org.), *Conhecimento Prudente para uma Vida Decente – 'Um Discurso sobre as Ciências' Revisitado* (pp. 253-272). Porto: Edições Afrontamento.
- Verheij, B. (2005). Evaluating Arguments Based on Toulmin's Scheme. *Argumentation*, 19(3), 347-371.
- Vigotski, L. (1934/2001). *A Construção do Pensamento e da Linguagem*. Tr. Paulo Bezerra. São Paulo: Martins Fontes.

Welch, W. W. (1971). *Review of the Research and Development Program of Harvard Project Physics*. Columbus: ERIC Information Analysis Center for Science Education, monograph.

Recebido em: 24.07.2010

Aceito em: 11.05.2010

ANEXOS

Foram usados os seguintes códigos nos turnos de fala: P - Professor da disciplina; A1,2,3... - Alunos 1,2,3...etc.; Trechos sublinhados das falas indicam uma referência direta ao texto ou à discussões referentes às atividades; ... - pausa na fala; (()) - comentário dos pesquisadores; / - interrupção na fala; palavras em negrito representam ênfase na pronúncia da mesma.

Episódio I – O significado das distâncias S_L e S_T

Turnos	Falas	Comentários
01	A2 – Aqui é uma consideração, que ele ((Newton)) faz, do movimento da Lua caindo. Tem que compreender essa distância da Lua como sendo a distância de queda, ele tá pegando essa distância S_L que seria a distância percorrida pela Lua...	A2 inicia explicando que o objetivo do Passo 2 é provar que $S_L = S_T$. No seu argumento, ao afirmar que estas distâncias são iguais, mostra não compreender o significado das mesmas, pois não inclui o elemento tempo.
02	A21 – Sessenta raios terrestres...	
03	A2 – Esse S aqui, isso aqui tá querendo provar que esse S_L é em função do raio da Terra, tá querendo provar isso. Você tá querendo achar, você vai achar, como ele calculou, aqui que você vai ver que isso é exatamente igualzinho, e o S, esse S_T ((apontando o texto)) aqui é o comprimento do raio da terra percorrido pela Lua, ele provou que S_L é igual a S_T . Esse é o segundo passo: provar que/	
04	A21 – Newton reduziu o tempo... O tempo é igual a um segundo. Então, o que ele percorreria em um minuto, desce em um segundo, porque esse sessenta vem do raio da Terra, aqui vai dar a mesma, aqui vai dar a mesma... Como se ela tives-se na superfície.... Por sessenta porque o raio é sessenta vezes o raio da Terra.	Diferentemente de A2, o aluno A21 mostra que compreendeu o significado de S_L e S_T .
05	A2 – A aceleração. O segundo passo é só fazer a demonstração, você demonstrar que S_L é igual a S_T .	
06	A1 – É.	
07	A2 – O terceiro passo que é você comparar a aceleração.	
08	A1 – Isso aí eu entendi. ((em seguida aponta, no texto, a parte que ele não entendeu)).	
09	A2 – É que ele comparou, na verdade ele queria provar que a distância era a mesma. Por que? ((aqui há um breve trecho incompreensível))... Você vai abstrair, abstraindo você vai ter, no caso, se a Lua... a distância da queda da Lua e a distância percorrida pela Lua, ele comparou os dois... ou seja, a distância percorrida pela Lua é a mesma distância de queda da Lua. É só comprovar isso.	A2 ratifica seu argumento, confirmando a compreensão errônea das distâncias.
10	A1 – Calma... Tem que botar um diferencial aí. A distância daquela queda lá ((apontando para cima)) é igual à queda na superfície. É isso?	A1 questiona a explicação de A2.
11	A2 – A distância da queda da Lua vai ser exatamente a distância... espera, agora confundiu a p. ((palavrão)) toda. A distância de queda da Lua vai ser exatamente a distância percorrida pela Lua naquele tempo.	A2 mais uma vez corrobora seu entendimento.
12	A21 – Não! Né isso não! Ele reduziu o tempo de um minuto pra um segundo, por causa da função de sessenta segundos e um minuto, e isso ficou equivalente a reduzir a distância de sessenta raios para um raio. Como ele conseguiu imaginar isso, aí eu não sei. Só se ele pegasse o quadrado do tempo também, só assim.	A21 discorda, enfatizando o papel do elemento tempo na redução feita por Newton.
13	A2 – Um minuto não é igual a sessenta segundos? Então, um minuto é igual a sessenta segundos. Você vai... se você reduzir de sessenta a distância, certamente vai ser igual. Um minuto é igual a sessenta segundos, então a queda da Lua em um minuto/	A2 confunde a redução feita por Newton uma transformação de unidades.
14	A21 – Vai ser um valor sessenta vezes maior do que o outro/	
15	A2 – Exatamente! Vai ser sessenta vezes...vai cortar/	
16	A21 – Mas, isso não quer dizer que a relação vai ser igual a... Aqui na Terra vai ser igual a lá em cima.	A21 confirma sua discordância.
17	A2 – Mas, se as distâncias...	
18	A21 – Mas, isso vai dar ao quadrado do tempo.	
19	A2 – Mas, pela queda livre de Galileu, a Lua caindo vai ser igual. É a mesma coisa que a aceleração centrípeta. Se o tempo gasto vai ser o mesmo , aí provou que poderia usar como a Lua em queda, a gente viu essa prova aqui. Poderia botar esse argumento, que a aceleração centrípeta é igual à aceleração se a Lua tivesse caindo pra gente, sem o movimento tangencial.	A2 confirma novamente sua idéia de que as distâncias são iguais para o mesmo tempo.

Investigações em Ensino de Ciências – V15(1), pp. 61-95, 2010

20	A21 – Mas, ele quer dizer o seguinte: o deslocamento lá em cima é igual aqui na Terra.	
21	A2 – Igual não. Exatamente porque o deslocamento em um minuto, de um minuto reduziu para sessenta segundos, a distância percorrida em um minuto ele reduziu, vai ser igual à distância percorrida, vai ser proporcional a uma distância de sessenta raios da Terra.	Outra vez, mostra a sua confusão da redução do tempo com uma transformação de unidades.
22	A21 – A que ele percorre em um minuto lá, ele vai percorrer em um segundo aqui. Foi mais ou menos o que eu entendi.	Nestes turnos, o conflito entre os dois argumentos distintos se acentua.
23	A2 – Não! A distância percorrida em um minuto lá vai ser igual à distância percorrida em um segundo aqui? Não! ((todos dão uma pausa de alguns segundos para ler o texto))	
24	A2 – Ele reduziu de sessenta segundos/	
25	A21 – A altura da órbita da Lua. Para um segundo!	
26	A2 – A superfície da Terra! A superfície da Terra!	
27	A21 – Então, meu querido, reduzimos o tempo de sessenta segundos lá na órbita para o tempo de um segundo aqui, é isso que ele tá dizendo... Agora por que isso faz sentido...?	A partir deste momento, A2 pára de objetar o argumento de A21.
28	A2 – porque o raio da Lua é sessenta raios da Terra. Aí, vai ficar certinho o sessenta vai embora.	
29	A21 – Aí tá o T ao quadrado. Fica o R e o tempo ao quadrado mesmo? O tempo também? O R é ao quadrado. O tempo também é ao quadrado, pra ficar igual?	A partir deste momento o aluno A21 não ter percebido no texto que o tempo estava elevado ao quadrado. A2 mostra que o tempo está ao quadrado, o que justifica a simplificação na conta. Ambos concordam e chegam a um consenso sobre a causa da simplificação.
30	A2 – ((aponta o texto))	
31	A21 – Aí sim... Aqui é T ao quadrado. Concordo!	
32	A2 – O R e o T tem que ser ao quadrado.	
33	A21 – Porque aí fica sessenta do raio e sessenta do tempo. ((em seguida, passam um bom tempo lendo em silêncio)).	
34	A21 – Aqui tem que ver, porque a força na superfície é igual a sessenta vezes a força na órbita, sessenta ao quadrado vezes! ((mais um tempo de pausa))	
35	A21 – Aí reduz o sessenta, mas isso só seria válido se for ao quadrado isso aí. Se não for ao quadrado, não tem como validar isso aí.	
36	A2 – É por causa das forças, a força lá vai ser proporcional ao raio ao quadrado, e na superfície vai ser proporcional a um sobre R ao quadrado. Como o raio da terra é um sobre R, a outra vai ser proporcional a sessenta R.	
37	A21 – A força é proporcional ao deslocamento sobre o período ao quadrado, o período é o tempo.	
38	A2 – A força é inversamente proporcional ao período ao quadrado.	
39	A21 – O tempo é ao quadrado...	
40	A2 – E F é proporcional a um sobre o período ao quadrado.	
41	A21 – Aí, agora sim! Se você... Se a força lá em cima é sessenta ao quadrado vezes maior, menor, aí vai...	

Episódio II – Como Newton comparou a aceleração da Lua em sua órbita com a aceleração da gravidade na superfície da Terra? Quais os artifícios que ele utilizou para isso?

Turnos	Falas	Tipos de Interação	Comentários
01	P - Como é que Newton comparou a aceleração ((da Lua)) na altura de sua órbita com a aceleração da gravidade na superfície da Terra e falar também dos artifícios que ele utilizou pra isso. Por onde começamos? A turma aí da direita.	I	
02	A1 – Então, é... uma, um, um dos... assim; que... quando Newton fez essa.. essa observação <u>essa idealização da... da queda da Lua...</u> então ele começa fazendo esse comparativo da... da... no caso se é retirando do movimento da Lua é... o movimento tangencial, qual seria aí esse movimento de queda, como é que seria... essa, essa descrição desse movimento de queda, <u>pra fazer essa descrição ele se volta pra geometria</u> , ele tenta buscar parâmetros geométricos, equivalências, proporções, essa, essa descrição da queda, ele determina a distância tempo de queda, vai, <u>faz a proporcionalidade de força... com, com o inverso do quadrado, é... as forças proporcionais à distância... pelo ... inverso do quadrado do... do tempo.</u> E fazendo essas associações, ele chega a... a uma expressão da... da aceleração, no caso concatenando essas idéias, essas idéias de proporção, ele vai, se... direcionando a essa... idéia da aceleração.	R	O aluno argumenta, de forma incompleta e confusa, embora com alguns elementos adequados, que Newton se garante na geometria para descrever a queda da Lua. E, para chegar à expressão da aceleração, como conclusão , usa a proporcionalidade: $F \propto S/T^2$.
03	A2 – As acelerações são proporcionais, <u>porque a força é proporcional... ao raio ao quadrado, a um sobre o raio ao quadrado</u> , com essas associações ele achou a proporcionalidade das acelerações. <u>Ele fez a redução lá do tempo</u> , reduziu também o... o período de queda, o tempo de queda, e aí, ele chegou a essa conclusão.		O aluno cita a relação $F \propto 1/R^2$ como um dado para Newton chegar à conclusão de que as acelerações são proporcionais. Fala sobre a redução do tempo de queda da Lua (um minuto para um segundo) como um qualificador .
04	P – Tá bom! Pronto? Próxima equipe. Vocês são da mesma equipe, não é isso? ((referindo-se a A2)). Então, quem é a próxima equipe aí?	A I	
05	A8 – A gente adiciona o seguinte: o que a Lua percorre em um minuto lá ((se refere à órbita da Lua)), a distância, a Lua percorre na superfície ((se refere à Terra)) em um segundo, que é sessenta vezes... um minuto é sessenta vezes o... o segundo, e a altura da Lua era sessenta vezes semi-diâmetros. Por isso que a força era inversamente proporcional ao tempo, ao quadrado do tempo.	R	Complementa a resposta da equipe anterior. Conclui que a relação entre as distâncias de queda da Lua (S_L e S_T) e os raios da órbita e da Terra, que não tinha sido citada claramente pelo grupo anterior, leva à relação $F \propto 1/T^2$.
06	P - Ok! É... vamos pra terceira equipe, então? Terceira é aqui, quem é que vai ser o porta-voz da equipe?	A I	
07	A14 – A gente chegou até esse mesmo finalmente, só que aí a questão virou pra... a gente ficou na dúvida do seguinte, se... essa distância, se o raio da Terra não for sessenta vezes menor do que a órbita da Lua, ou melhor, corrigindo, esse acontecimento foi na verdade uma coincidência entre sessenta segundos (que é um minuto) e um segundo, e sessenta vezes a órbita da Terra, se por exemplo, a órbita da Terra, o raio da Terra em relação a órbita da Lua, fosse menor, digamos, trinta, essa proporção talvez não seria adequada, ou seja, você não poderia... na verdade foi uma coincidência que ele encontrou para poder resolver esse problema, foi por isso que agente parou aqui, porque se ele chegou a essa conclusão a partir de uma coincidência ou que outras formas, que outros argumentos ele utilizou pra fazer esses tipos de comparação?	R	Fala sobre a proporção 1/60, que é a mesma para raio da Terra/órbita da Lua (o que foi um simplificador nos cálculos de Newton), como uma coincidência que, caso fosse refutada , não levaria à conclusão $F \propto 1/T^2$.
08	P – Essa é uma boa pergunta, mas vamos deixar pra agente comentar depois tá certo? Ainda querem falar?	P	
09	A10 – Não, acho que a única relação que poderia existir desse sessenta ao quadrado que no caso são em relação... de ter passado pra segundo... a distância ser a mesma quando ele passa pra segundo, a única evidência assim que poderia... ter pra justificar esse, esse esse espaço que ela percorre mais aqui, ou esse tempo menor para o mesmo espaço, seria... a... aceleração, a proporção da força... no inverso do R dois ((R^2)), certo? Que no caso ele desenvolve e chega à conclusão de que... a força gravitacional aqui na Terra seria sessenta ao	R	Argumenta que as proporcionalidades $F \propto 1/R^2$ e $F \propto S/T^2$ são as garantias para a relação raio da órbita/raio da Terra ser igual à relação 1/60.

	quadrado vezes maior do que a força gravitacional... na Terra, na superfície da Terra. Então, se agente desenvolver aquela proporção de... F proporcional a... S sobre T dois ((T ²)), é isso, então... pode ser que chegue a essa conclusão.		
10	P – Quero só chamar a atenção que vocês estão trazendo dois problemas, quer dizer, duas possíveis respostas: uma (uma suspeita, né) será que isso aí não é uma coincidência, uma coincidência numerológica?; Mas, na segunda resposta, eu tô entendendo que você deu uma resposta um pouco diferente, na verdade a conta do Newton também depende dele ter assumido essa proporção do inverso do quadrado? Tá, tá bom! Vou deixar em suspenso. É... seguimos adiante? Vocês ainda querem falar alguma coisa? Não? Seria a terceira equipe, né? A quarta! Vamos lá? Quem é o porta-voz aí da equipe?	A	
11	A15 – Ele fala aqui sobre... <u>a distância que a pedra cai em um segundo na superfície da Terra. Newton utilizou o pêndulo de Huygens para calcular a aceleração aqui na Terra.</u> Ele pegou a altura, a altura proporcional à metade do pêndulo, e o... a circunferência ao quadrado, proporcional ao diâmetro. Aí, como resultado, eu achei 4,87 que é igual... que é igual à distância... que é igual primeiro... à distância que a Lua cairia em direção à Terra se fosse privada de todo o seu movimento tangencial.	I	
12	P – Quando a gente fechar o debate aqui, eu quero que vocês reflitam sobre o seguinte: é a quarta equipe e é sintomático que as três primeiras equipes não falaram nesse problema, quer dizer, o problema de como é que calcula a aceleração na superfície da Terra. Porque as três primeiras equipes, no fundo, explicaram como é que Newton pegou a aceleração na... lá em cima, né isso, e, por uma série de truques, converteu no valor da aceleração da Lua aqui na Terra, né isso? Agora, como ele compararia esse valor, como é que ele testaria se esse valor.../	R	Trás um elemento novo que é o pêndulo de Huygens e fala como Newton obteve a aceleração na superfície da Terra, com o pêndulo, para fazer a comparação entre os valores, trazendo mais uma garantia para a comparação.
13	A11 – Aí ele precisou do pêndulo.	F	Chama atenção para o fato de só uma equipe ter feito referência ao valor da gravidade dado pelo pêndulo de Huygens.
14	P – Aí ele precisou do pêndulo. Ou seja, sem o pêndulo, ficava um cálculo teórico, quer dizer, porque que... Bom, a gente vai debater. Vamos, vamos... a quinta equipe aqui agora.	R	
15	A16 – Agente quer dizer o seguinte: com relação a essa proporção que tava rolando comentário de sessenta e tal e se foi um jogo numérico, é porque, pelo que eu percebi, a... a... altura da Lua à Terra, seria sessenta raios, né? E quando ela desce pra superfície seria um raio terrestre, então foi daí que ele tirou essa proporção pra, pra chegar à aceleração da Lua na superfície da Terra. Aí, Newton comparou a aceleração da Lua na superfície da Terra durante um intervalo de tempo de um segundo, no caso, com a aceleração de um pêndulo na superfície neste mesmo tempo. Aí, Newton conseguiu valores bem aproximados e deduziu que a mesma força que acelera a Lua, seria, é a força que acelera o peso porque, porque, caso contrário, pra ele teria outra força além da aceleração do peso aqui, acelerando o peso, que seria essa força que acelera a Lua, e ele não encontrava isso, né.	A	
16	A6 – É, sendo que, como... <u>à medida que as distâncias variam a aceleração também esta variando, a causa que faz com que a Lua mantenha essa órbita teria que ser a mesma que faz os corpos caírem, porque se não teríamos duas forças atuando e as experiências não demonstravam isso.</u> Aí, você teria uma força que era a da Terra, e essa é inevitável, e teria que encontrar uma segunda explicação, pra essa outra força, aí já fugiria totalmente ao que os cálculos estavam demonstrando. A outra coisa é com relação a... às dificuldades que ele encontrava né? É... na época, <u>aqui ele ((o texto)) fala de epistemologia né, a forma como a ciência era pensada naquele período, a corrente mais fácil que tinha... era a mecanicista.</u> Porque Descartes era um dos principais líderes, e... contrariava, da forma como ele tava pensando o movimento da Lua. Aí, o que o mecanicismo respondia, né. Como você... <u>como o senhor falou assim</u> ((se refere ao professor)), <u>se hoje a gente vê isso com grande facilidade, naquela época era complicado, e era complicado romper essa barreira aí, como ele não tinha explicações físicas pra sustentar as explicações dele na época, ele se sustentou em explicações matemáticas, e... à medida que a matemática exigia uma coisa, ele ia embutindo justificativas, pra que aquela coisa se... pra que o movimento a-</u>	I	
		R	A proporção R_{Terra}/R_{Lua} : 1/60 leva à conclusão : acelerações a_{Lua} e a_{Terra} são proporcionais. A16 toma esta conclusão como um dado para outra conclusão : F_{Lua} é a mesma F_{Terra} . Depois, põe um argumento refutador : se tais forças não fossem a mesma, haveria outra força sobre a Lua, o que não se verifica. Aqui, o aluno retoma a argumentação de A16, de forma mais elaborada, embasada no texto e em discussões anteriores. Apresenta a Conclusão de que a causa que faz com que os corpos caiam na superfície da Terra é a mesma que mantém a Lua em sua órbita e a refutação de que, caso não fosse a mesma causa, os resultados não concordariam com os cálculos e com a experiência.

	tendesse ao que ele tinha calculado e, aí ele ia colocando as, as exigências, né.	
17	P – Tá certo. Agora, feito essa versão, vamos entender o seguinte, feito essa versão, se agente pensa na pergunta que foi feita: Explique como Newton comparou a aceleração da Lua em sua órbita com a aceleração de gravidade na superfície da Terra. Veja que a pergunta é, como é que ele comparou uma com a outra então, as três primeiras equipes, ao não falarem do cálculo da aceleração pelo pêndulo, não responderam à questão diretamente, ou seja, na verdade explicaram qual foi o truque que Newton utilizou pra, é... transpôr uma aceleração que ele podia calcular com dados astronômicos, pra uma aceleração que era um experimento imaginário. É evidente que a Lua não podia bater na superfície da Terra, né. Mas, ou seja, eu acho até que vocês pensaram no problema e... não tô dizendo que tá certo ou tá errado, seu eu fosse congelar a resposta de vocês, a resposta estaria insuficiente. Porque... é na comparação dos dois valores que... digamos assim, aparece a força do Newton, né. Porque é na comparação, eu acho que vocês dois aí que enfatizaram ((se refere à equipe do aluno A12)), que o Newton dá uma espécie, assim, de pulo do gato. Foi a... as últimas equipes que enfatizaram isso aí, ele diz assim: Se não fosse a mesma força, se a força que mantém a Lua lá em cima fosse diferente da que faz um corpo cair aqui, então nós teríamos duas força, é... agindo sobre o corpo, e esses resultados a a... digamos assim, a comparação é... digamos assim, é... não bateria. Vamos entender melhor esse argumento, ou seja, na hora que a Lua tá chegando na Terra, todo mundo admite que ela chega na Terra, ela cai com uma força que é a força gravitacional análoga ao peso ... independente de qual seja a gravidade, se você admite que essa força é diferente da força que mantém a Lua lá em cima. Você tinha, então, que admitir que quando a Lua chegava aqui, agiam sobre ela duas forças: a do peso, porque todo corpo na superfície da Terra, todo corpo na superfície da Terra tem peso; e a força que agia sobre ela lá em cima, porque a força não deixou de existir, né. Então daria, se elas fossem diferentes, daria pra aceleração da Lua na superfície da Terra, um valor diferente do valor da Gravidade. Então, é aí que ele procura... digamos assim, amarrar bem a questão. Bom, a única ponderação que eu faria. Eu gostei. Agora, dois comentários rápidos: essa pergunta aí se os cálculos de Newton dependem ou não dependem dessa numerologia aí de sessenta, a pergunta é boa! Agora vamos parar e pensar o seguinte, pra o modo como ele fez o cálculo, é claro que depende, pra o modo, quer dizer, o truque do cálculo né. É isso que torna o cálculo simples, se não fossem esses os dados, os cálculos seriam mais trabalhosos, você pode até imaginar, se a civilização tivesse surgido em Marte ou Júpiter, né. O Newton jupiteriano teria mais dificuldade pra chegar a essa conclusão do que o Newton, é, terrestre. Agora, será que o resultado, a equivalência da gravidade do corpo que cai com a força que mantém a Lua, essa equivalência não seria mantida?... Eu acho que seria! Porque os sessenta entrou aí facilitando a conta, e aí pra vocês inclusive verificarem isso, vocês vão ver que quando você fizer o cálculo, o segundo, a segunda abordagem, que é uma abordagem própria para o segundo grau, esse modo, esse modo que o Newton utilizou, a gente vai utilizar de maneira diferente, então esse corta sessenta com sessenta não é tão...	A O professor faz uma avaliação mais detalhada da discussão dos grupos, mostrando que as respostas dos primeiros grupos estavam incompletas por não se referirem ao valor da aceleração aqui na Terra encontrado através do pêndulo de Huygens. Mas, no decorrer da discussão, as outras equipes complementaram as respostas e ele avalia de forma satisfatória a resposta da turma. Em seguida, reforça a resposta dando um feedback e comenta sobre a questão da coincidência numérica, enfatizando que, mesmo se ela não existisse, Newton obteria o mesmo resultado, só que de uma forma mais trabalhosa.

Episódio IV - Qual o principal obstáculo enfrentado por Newton para introduzir a idéia de uma força gravitacional de ação à distância? Que saída ele encontrou para minimizar o problema?

Turnos	Falas	Tipos de Interação	Comentários
01	P - Bom, ainda tem a terceira questão, vamos lá! Qual o principal obstáculo enfrentado por Newton para introduzir a idéia de força gravitacional de ação a distância, e que saída ele encontrou para resolver o problema. Talvez alguém já tenha arranhado a resposta, mas vamos ver quem enfrenta ai pra dar uma resposta de A a Z. Ta bom,vá lá.	I	
02	A12 – A questão em relação à força, é que ele propõe uma força sem contato, até o momento não se concebia a idéia de uma força sem contato, e a questão de explicar ele não explica, mas ele usa a, a... sedimentação matemática dele, pra mostrar que aquela força era uma consequência do que ele já tinha provado, e não pra provar a força em si.	R	O aluno argumenta que a ação à distância é garanti-da pela idéia de força sem contato, que se funda-menta na matemática. Mostra a percepção da re-futação pelos mecanicistas à conclusão de Newton.
03	A11 – No fundo no fundo, é uma briga entre <u>mecanicistas e instrumentalistas</u> , né.		
04	P – Vocês vão ver em outros momentos do Newton. Bom, alguém quer complementar essa pergunta? Não? Tá perfeita a resposta. Então, fazendo um comentário adicional a... evidente que essa, essa atitude do Newton, os adversários, quer dizer, os cartesianos não aceitaram isso facilmente. Nós vamos falar um pouco mais aqui no curso, foram pelo menos uns cinquenta anos de embate é... de um lado e do outro e... lá pras tantas, quando o Newton tenta se defender, ele usa uma frase que é muito famosa, que é a frase do ‘não faço hipóteses’, né... É dessa vez que ele tenta se defender na matemática e dizer ‘olha, isso funciona’, e se funciona bem, nós temos que aceitar é... sem discutir. Mas, muita gente vai discutir se realmente Newton não fazia hipóteses.	A	O professor avalia como “perfeita” a resposta do aluno A12 e conclui a questão comentando a dificuldade de Newton frente aos adversários e sua afirmativa sobre não fazer hipóteses.

Episódio V - O que você entende por síntese newtoniana? Qual a importância e implicações dessa síntese?

Turnos	Falas	Tipos de Interação	Comentários
01	P - Então vamos lá. Vamos começar a discussão da terceira questão. Todo mundo fez aí? Vamos começar...	I	
02	A4 - A conclusão, né, que Newton teve é que a força que envolve os corpos celestes é válida também para corpos terrestres. Isso possibilitou um estudo em conjunto da física celestial e dos corpos terrestres. Uma consideração que agente fez, né, é que a força que acelera uma pedra na superfície da Terra é de mesma natureza de que a força que mantém a Lua em sua órbita.	R	Argumentação sumária da síntese newtoniana. As forças de mesma natureza como garantia para o estudo conjunto das físicas celeste e terrestre.
03	P - Correto. A próxima equipe... vamos lá rapaz... ficou nervoso? ((em tom de descontração em função da demora do aluno em responder)).	A I	
04	A5 - Não, não fiquei nervoso... é... as afirmações que ele fez ((se refere a A4)) foi justamente o que a gente fez aqui no grupo, não tem nenhuma... relacionado à primeira pergunta, alguma coisa diferente a acrescentar.	R	
05	A6 - Na verdade é aquilo que ele falou, né ((se referindo a A4)) a síntese newtoniana, ela elimina aquela idéia de que a coisa funciona de um jeito aqui, e de outro jeito lá fora, né ((se referindo ao espaço celeste)). Ele, <u>a partir até daquele experimento lá da Lua, quando ele demonstra que a força que atua sobre ela lá é a mesma que atua sobre ela se ela tiver sendo atraída aqui no centro da Terra, isso aí... praticamente bate o martelo de que não existe como ser diferentes, como por exemplo, pra os mecanicistas, ainda o movimento dos corpos celestes ainda era gerado pelo tal do éter, né/</u>	R	Complementa a resposta, fazendo uma argumentação competente embasada no texto: forças sobre os corpos celestes e terrestres sendo de naturezas diferentes refutam a idéia de movimentos celestes e terrestres serem de mesma natureza.
06	A7 - Por contato.		
07	A6 - Exato. Tinha aquele contato que fazia com que ele girasse, né, sintetizando a idéia dele. Ele elimina essa coisa de que existe diferença entre os movimentos aqui e fora da Terra.		
08	P - Bom. Qual é a próxima equipe? Vocês aí, né?	A I	
09	A8 - Newton uniu a física celeste com a física terrestre.	R	
10	P - Essa é a síntese newtoniana? ((todos riem)).	P	
11	A1 - É a síntese da síntese newtoniana.	R	
12	P - Qual é a próxima equipe? Vocês, né? Bom, se vocês têm coisas a acrescentar. Se não tiver...	I	
13	A9 - A nossa é a síntese da síntese dele ali... ((todos riem))... a formação de uma nova física que pode ao mesmo tempo explicar a física terrestre e a física celeste.	R	
14	P - A ultima equipe aí, ainda tem como acrescentar?	I	
15	A10 - É... com relação à importância... à importância dessa síntese é que... que Newton rompe totalmente com o geocentrismo... comprovando matematicamente que... o centro do universo é o heliocentrismo, tal, e também ele acaba... ele acaba com a idéia, com essa necessidade de que precisa haver uma força de contato pra que essa força que... centrípeta, no caso, que resulta nas órbitas dos satélites e dos planetas em trono do Sol é de mesma natureza da gravidade terrestre, então...	R	Fala das implicações da síntese newtoniana: apoio ao heliocentrismo, tendo como garantia a comprovação matemática; e ruptura com a idéia de força de contato.
16	A11 - Reforça a questão do... isso, essa síntese dele, indo mais além, reforça a idéia do seguinte: do heliocentrismo. Ele mata de uma vez a questão do geocentrismo, <u>porque no que ele se baseou no estudo de Kepler, tal, tudo isso só funciona para corpos girando, né, para planetas girando em torno do Sol</u> . Isso é uma coisa importante na minha interpretação.		Embasado no texto, a importância da síntese newtoniana como apoio ao heliocentrismo, tendo como garantia o fato do movimento dos planetas só obedecer às leis de Kepler se forem tomadas distâncias dos planetas em relação ao Sol.
17	P - É uma das implicações, né isso? Tá bom! Bom, é... eu não teria nada a acrescentar ao que vocês apresentaram aí, eu acho que está perfeito... quer dizer, na verdade nós temos mais de uma pergunta aqui. E a primeira pergunta: o que é	A	O professor avalia como “perfeita” a argumentação construída pelos grupos e

Investigações em Ensino de Ciências – V15(1), pp. 61-95, 2010

a síntese newtoniana é o que um pouco essa equipe aí de vocês foi em cima com a unificação da física terrestre com a física celeste...e aí, a importância e a implicação dessa síntese é o que eu acho que vocês aí do lado de cá começaram a desenvolver mais, quer dizer, é um enorme apoio ao heliocentrismo, é uma nova visão de mundo e de ciência, de física, com essa idéia de... digamos assim, abrindo mão da idéia de força de contato. Então essas são as implicações.	faz um resumo da mesma.
---	-------------------------

Episódio VI - Que argumentos Newton utiliza para adotar o sistema heliocêntrico?

Turnos	Falas	Tipos de Interação	Comentários
--------	-------	--------------------	-------------

01	P - Que argumentos Newton utiliza para adotar o sistema heliocêntrico?	I	
02	A1 - É... é uma... uma... Como é que diz, é justamente, a interdependência entre as leis de Kepler e a existência da força central, ele fala que o movimento circular, que obedece à lei de Kepler, necessita dessa força central. Assim, quando ele, ele faz essa...essa junção, né, ele estabelece essa interdependência, deixe eu ver aqui a pergunta, só pra ver se eu tô falando... é, é isso justamente.	R	O grupo aponta a interdependência entre leis de Kepler e força central como garantia para adoção do sistema heliocêntrico por Newton. Forças centrais, do tipo $1/R^2$, fundamentam às leis de Kepler.
03	A2 - E isso só funciona se tiver o Sol no centro, se botar a Terra no centro essa... isso não vai funcionar certo.		
04	P - A pergunta é a seguinte: Será que o argumento... Vou pegar uma parte da resposta de vocês, não tô pegando a resposta toda. A resposta é assim: as leis de Kepler só funcionam botando o Sol no centro pra que o R três sobre T dois ((R^3/T^2)) seja a distância em relação ao Sol e não em relação à Terra. Isso é uma prova irrefutável a favor do heliocentrismo, ou não?	P	
05	A11 - É... Sim, eu acho que sim.	R	Ambos respondem simultaneamente.
06	A13 - Não.		
07	P - Quem disse sim, primeiro, tem direito a falar. Quem disse não, tem direito a falar depois.	P	
08	A11 - Eu acho o seguinte, pelo que já foi estudado é o seguinte: isso dá um valor constante, pra... <u>Esse R três sobre T dois dá um valor constante, mas essa constante só será válida e será única, se tudo isso for em função do... se tiver girando em função do Sol. Ele ((Newton)) deixou bem claro que se for em função de outros planetas, isso não vale.</u> Então é... eu acho que é por aí, acho que isso é irrefutável.	R	Ratifica, embasado no texto, a 3ª lei de Kepler como garantia para o sistema heliocêntrico, uma vez que aquela é válida se os corpos girarem em torno do Sol.
09	A4 - Também ele fala no texto aqui que...as leis de Kepler podem ser derivadas, naquela proporção que ele afirma que ele comprovou no livro um ((se refere ao Livro I dos “Principia”)) <u>de que a força em relação à distância, a força centrípeta, é inversamente ao quadrado da distância.</u> Se ele comprovou que essa proporção é verdadeira e que a lei de Kepler deriva dessa força, então eu acredito que a lei de Kepler possa ser confiável.		Embasado no texto, complementa o argumento colocando a força central, do tipo $1/R^2$, como fundamento de que a 1ª lei de Kepler é válida.
10	P - Bom, vamos ver quem diz que não, depois eu... eu meto minha colher na brincadeira.	P	
11	A13 - Você falou (...), ((cita o nome do professor)) que é irrefutável em relação ao heliocentrismo. Eu acho que não por que, assim, os planetas obedecem às leis de Kepler ao redor do Sol, e os satélites, ao redor dos planetas, então se fosse na época acho que não ia derrubar não, porque você está dizendo ao redor do Sol, mas também tem as luas de Júpiter e tem a Lua aqui da Terra... Eu fico assim meio...	R	Apresenta um elemento refutador na argumentação: $R^3/T^2 = \text{constante}$, não somente para o Sol no centro, mas para qualquer corpo girando em torno de outro, então a 3ª lei de Kepler não constitui garantia para o sistema heliocêntrico.
12	P - A questão é... eu sei que ela é... não tem uma resposta... digamos assim direta, é... porque no fundo a resposta do Newton é assim: você vai juntando a primeira lei de Kepler com a terceira lei, com a demonstração matemática dele ((Newton)) de que é o inverso do quadrado da distância, aí você juntando tudo isso, você diz assim: bom, se eu não aceitar o heliocentrismo, eu tenho que ter um enorme trabalho pra explicar, como é que vale a terceira lei de Kepler, como é que vale a... digamos assim, a primeira lei de Kepler, num sistema que não seja o heliocentrismo. Então, no fundo, no argumento do Newton tá embutido aí um argumento de simplicidade, quer dizer, pondo o Sol no centro e admitindo a primeira lei, admitindo a terceira lei, eu consigo derivar uma força do inverso do quadrado da distância e com a força do inverso do quadrado da distância eu consigo mostrar de que a aceleração da Lua aqui na superfície da Terra é igual à aceleração medida pelo pêndulo, né. Mas, isso não é um prova irrefutável no sentido assim de que... a princípio, alguém poderia pensar, o que não é absurdo, alguém... tentar na época ir por um outro caminho, caminho do tipo... aceitar que de fato a terceira lei, as distâncias têm que ser consideradas em relação ao Sol e ainda buscar compatibilizar isso,	A	O professor considera os argumentos dos dois alunos que divergiram suas opiniões, procurando explicitar os aspectos corretos de ambas as justificativas e, assim, arremata a discussão, resumando a argumentação construída coletivamente.

por exemplo, com o modelo do Tycho Brahe, todas as distâncias dos planetas são em relação ao Sol, mas o Sol gira em torno da Terra, então onde é que fica a prova irrefutável? É claro que aí pra você fazer com o modelo do Tycho Brahe, fazer todas essas contas e todas essas demonstrações que Newton tá fazendo, aí já fica uma batalha... praticamente impossível, não é?	
--	--

Episódio VII - Que conclusões você chega sobre o trabalho de Newton depois da leitura do artigo e da atividade em classe?

Turnos	Falas	Tipos de Interação	Comentários
01	P - Ok! Nós temos ainda uma última pergunta um pouco mais a-berta assim: que conclusões você chega sobre o trabalho de New-ton depois da leitura do artigo e da atividade em classe? Vamos fazer uma coisa bem aleatória vamos começar aqui pelo meio.	I	
02	A19 - A gente concluiu que...ele não fez tudo só, mas ele apoiou-se em vários trabalhos de outros físicos que antecederam e contemporâneos também.	R	Visão de ciência cons-truída a partir do traba-lho coletivo e não de um único “gênio”.
03	P - Vocês são a primeira equipe, têm a chance de falar pra caramba, heim! É isso? Então... vamos ver aqui uma que tenha falado menos... vocês aí! ((aponta para outro grupo))	P I	
04	A20 - Newton mudou o rumo da ciência, derrubando o conceito de geocentrismo e introduzindo o conceito de interação entre os corpos, sem contato mecânico e derrubando assim o éter de... cartesiano.	R	Acentua alguns feitos científicos de Newton, responsabilizando-o por mudar os rumos da ciência. Implícito aqui a idéia do cientista herói.
05	P - Tá bom! A equipe de cá! ((aponta para o terceiro grupo))	A I	
06	A10 - A gente concluiu que... Newton apresentou resultados irrefutáveis pra época, por ele ter demonstrado matematicamente e ter contextualizado as... os resultados que... que ele teve como resultados... certos , digamos assim, em seu estudo e acrescentar.	R	Visão positivista, resultados irrefutáveis por estarem “certos”, garantidos, uma vez demonstrados matematicamente e a visão de ciência cumulativa.
07	A13 - Somado a isso... a cautela de ter... ter estudado tudo que a... já se havia construído de ciência, filtrado o que servia pra explicar tudo que ele havia... deduzido, e criado ferramentas que justificassem suas deduções. O cálculo como uma ferramenta principal para a comprovação matemática e científica.		
08	A11 - E criando assim uma nova visão de mundo. Por parte dele! ((risos))		
09	P - Vamos lá! ((aponta para o grupo seguinte))	I	
10	A6 - Eu acho que... é... <u>a gente andou conversando aqui... O grande aprendizado aqui, nesse debate, que nós observamos</u> , é que a ciência tenta às vezes de uma forma é... de uma forma não tão precisa, às vezes você tem que... buscar várias possibilidades, nem sempre a ciência é feita de certezas e sim de possibilidades e às vezes você não tem que provar que aquilo é verdade, à medida que alguém simplesmente não consegue provar que você tá errado, então é importante conhecer o todo, pra que quando você vá defender seu trabalho você não acabe ferindo o trabalho de outras pessoas sem ter uma justificativa plausível pra aquilo, no caso de Newton era a matemática, né. Quando ele contrariava alguém ele se... recorria à matemática pra mostrar que ele estava correto e que se alguém dissesse a ele que não estava correto, que fornecesse a ele uma condição mais aceitável que a dele, acho que o... grande feito dele foi... ele soube se sustentar, mesmo sem as certezas, mas ele soube se sustentar da forma mais aceitável possível pra época e tanto quando você fala que até hoje... grande parte dos argumentos dele não são contrariados.	R	Visão oposta às anteriores. Ciência tem natureza conjectural, sem certezas. O conhecimento requer justificativas, mas não necessariamente provas. O aluno se refere explicitamente ao debate que ocorreu em sala, durante a atividade, para relatar as visões do grupo.
11	P - Bom! Então, faltam duas, né isso? A da esquerda depois a da direita.	A I	
12	A5 - Só pra acrescentar...a questão de... de introduzir... a questão de introduzir, como eu tinha falado nesse instante, a gravidade! Todo o trabalho que ele fez, e chegou no final, conseguindo introduzir... essa força, essa força que ele vem falando e introduzir justamente... é... essa questão; colocar o vácuo no espaço, né. E... o que até no momento ele não tinha chamado de... de... de gravidade né? E... no vácuo haver uma interação entre esses corpos sem nenhum contato, eu acho é que isso é que foi chocante naquela época, é conceber que um corpo tá aqui longe do outro, não existe ar, não existe nada, e que existe alguma interação entre eles; isso é que era difícil de enxergar, né. É... são coisas que a gente não pode mensurar, não pode, não, a gente não teria como mensurar, eu acho que isso é que foi chocante na época, né. É tentar enxergar essa coisa invisível, essa interação invisível, à longa distância, o que é o mais	R	A5 é do mesmo grupo que falou anteriormente. Chama à atenção para o feito de Newton de introduzir uma idéia não demonstrável empiricamente na sua época: a idéia de ação à distância sem meio material (no vácuo) para propagar a interação.

	interessante.		
13	P - Tá bom! ((aponta para o próximo grupo)).	A I	
14	A2 - Ele criou, né... através dele, criou pilares pra reestruturação da física a... reelaboração da física. Através dele a física começou a... se desenvolver mais, né. Começou, derrubou muito, né, tanto que... pela biografia, não tinha tantos livros de física, né. Ele começou a... ele mesmo a elaborar uma nova física, certo. Foi ele que praticamente consolidou a, ou se esconder em matemática, né. Pegar a matemática pra explicar fisicamente, Kepler tinha dado uma introduçãozinha antes, mas foi Newton mesmo quem deu a introdução do cálculo diferencial e integral, essa noção de limite... Isso aí.	R	Aparece novamente a idéia de um Newton herói, responsável por modificar os rumos da física, apoiado na força da matemática.
15	P - Bom. ((aponta para o próximo grupo))	A I	
16	A4 - O que a gente pôs aqui foi... a maior consolidação do sistema heliocêntrico e o desenvolvimento matemático e coerente da mecânica. ((risos))	R	
17	P - Tá bom! Se eu tivesse que dizer uma coisa a partir da própria conclusão de vocês eu mostraria pra vocês exatamente o seguinte: como vocês mesmos perceberam, chegar à idéia de uma força gravitacional é... não foi simples. É uma idéia que... foi na época ousada, difícil de ser aceita. Como (...) ((cita o aluno A5)) frisou, apelava pro invisível... e como outros aí frisaram, que a gravitação ajudou, como você disse aí ((aponta para um dos alunos)), foi o ponto de chegada, ou seja, com a gravitação a gente vê, então, a mecânica fica de pé! Por isso que é chamada também de síntese newtoniana. Então, se a gravitação foi tão importante na construção da mecânica, veja que é uma coisa muito empobrecedora pro ensino de física, um ensino de física que... deixa a gravitação um pouco de lado... introduz rapidamente, ou seja, se a gravitação é essa coisa tão importante, em qualquer curso de física a discussão da força gravitacional deveria ter um grande espaço.	A	O professor reconstitui sumariamente as argumentações dos alunos, ressaltando a ousadia das idéias inovadoras de Newton, constituindo seu trabalho de síntese e estruturando assim a mecânica. Finaliza com a importância, portanto, desse tema para ser inserido no ensino.

Capítulo 5

**Uma Proposta Didática para Ensinar Gravitação Universal de Newton,
Orientado por História e Filosofia da Ciência, com Enfoque na
Argumentação**

O Ensino da Gravitação Universal de Newton Orientado por História e Filosofia da Ciência: Uma Proposta Didática com Enfoque na Argumentação

Elder Sales Teixeira

(Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana;
PPGEFHC/UFBA-UEFS)

Olival Freire Jr.

(Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia; PPGEFHC/UFBA-UEFS)

Ileana Maria Greca

(Departamento de Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos-
Spain; PPGEFHC/UFBA-UEFS)

Introdução

Neste trabalho assume-se a concepção de que a ciência, enquanto atividade humana cujo conhecimento produzido é socialmente construído, tem a argumentação como um de seus aspectos constitutivos essenciais. Tanto no processo da criação da ciência, quanto na sua justificação, a argumentação exerce um papel fundamental *“como elemento estrutural da linguagem da ciência”* (Jiménez-Aleixandre et al., 2000). A ciência se produz, dentre outras coisas, a partir do debate público no qual os protagonistas de teorias que concorrem entre si se valem da argumentação para se posicionar, defender suas idéias e se contrapor às dos oponentes sustentando-se no acordo entre as evidências que têm à disposição e as teorias. Neste sentido, a ciência é também um empreendimento de natureza social que avança por meios de processos interpessoais de pensamento nos quais as controvérsias e a argumentação têm seu lugar. Mudanças no pensamento científico, de um modo geral, não ocorrem em função unicamente das idéias geniais de um indivíduo, mas são atribuídas também a fatores sociais que interferem na produção de tais mudanças (Kuhn, 1993).

Assim, conforme assinala Naylor et al. (2007), *“esta relação próxima entre argumentação e ciência sugere que a argumentação deveria ser uma importante parte da educação em ciências”*. Portanto, é necessário que os estudantes aprendam a argumentar para se apropriar do gênero do discurso científico e, assim, possam estar instrumentalizados para compreender melhor o conteúdo científico, bem como sua natureza (Driver et al., 2000; Jiménez-Aleixandre et al., 2000; Capecchi e Carvalho, 2000; Munford e Zembal-Saul, 2002).

As razões para a necessidade de propostas didáticas com enfoque em promover aprimoramentos na habilidade de argumentação dos estudantes, conforme já foi exposto pelos autores do presente trabalho em Teixeira et al. (2010a) em menção aos argumentos de Erduran et al. (2004), podem ser de natureza epistemológica – a partir da visão da ciência que avança na tentativa

de solução de conflitos – e também cognitiva – a partir da perspectiva educacional sócio-interacionista extraída de Vigotski (2000).

Em relação ao uso de abordagens didáticas no ensino de física orientadas pela história e filosofia da ciência, há uma extensa literatura apresentando argumentos de cunho teórico sobre esta temática, entretanto, conforme a revisão sistemática da literatura específica feita por Teixeira et al. (2009), o número de pesquisas que investigam empiricamente intervenções didáticas com uso de história e filosofia da ciência em salas de aula de física é relativamente escasso, o que corrobora os resultados encontrados por Carvalho e Vannucchi (1996) que relatam uma assimetria entre o crescimento das preocupações dos pesquisadores e o número de propostas didáticas efetivamente empregadas em sala de aula com este enfoque. Os resultados desses dois trabalhos remetem à necessidade de implementação de propostas didáticas com esta natureza e, neste sentido, o presente trabalho vem oferecer uma contribuição para os professores que compartilham da mesma preocupação e pretendam fazer uso da história e filosofia da ciência em salas de aula de física para tratar do tema gravitação universal de Newton com enfoque em promover habilidade de argumentação aos alunos.

Argumentação no Ensino de Ciências: O *Layout* de Toulmin

A literatura que trata de investigar o uso de atividades no ensino das ciências com enfoque em propiciar uma melhoria nas habilidades de argumentação dos estudantes ainda é relativamente escassa (Abi-El-Mona e Abd-El-Khalick, 2006), embora tenha aumentado nas últimas décadas. Dentre os trabalhos com esta temática, uma parcela significativa utiliza como instrumento de análise a estrutura (ou *layout*) de argumentação proposta por Stephen Edelston Toulmin em seu mais impactante livro “*Os Usos do Argumento*” (Toulmin, 1958/2006)¹. Entretanto, uma dificuldade que se pode perceber nessa literatura diz respeito à pouca discussão sobre os fundamentos dessa proposta e que levaram Toulmin a propor seu *layout* de argumentação; bem como há pouca discussão sobre a importância de se compreender estes fundamentos para justificar devidamente a escolha do *layout* de Toulmin como padrão de argumentação para o ensino das ciências.

Neste sentido, antes de apresentar a proposta didática da qual trata este trabalho será feita, nesta seção, uma discussão sobre as razões que o próprio Toulmin estabelece em seu livro (Toulmin, 1958/2006) para elaborar seu padrão de argumentação como um modelo apropriado para se argumentar, na prática, em campos de conhecimento diversos. Será feita uma síntese da sua crítica à forma silogística, acatada pelos lógicos da primeira metade do século XX como paradigma de argumentação; será feita também uma apresentação do seu *layout* de argumentação discutindo-se o significado de cada elemento constituinte de um argumento, bem como sua função na estrutura do mesmo apontando-se, em tempo, as limitações do silogismo; e, ainda, será feita uma discussão sobre o papel de tais críticas para se compreender as vantagens

¹ Para se ter uma ligeira idéia da influência de Toulmin, e em particular desta obra, na filosofia da segunda metade do século XX, ver GRIMES (2009).

pedagógicas do uso do modelo de Toulmin no ensino de ciências com enfoque na argumentação.

Toulmin (1958/2006) aponta que a lógica formal foi desenvolvida a partir de um estudo do silogismo analítico e este foi adotado pelos lógicos formais, tais como Kneale, Strawson, Carnap, Hare e Prior, como paradigma buscando encontrar padrões teóricos universais que serviriam para analisar argumentos oriundos de qualquer campo de conhecimento racional.

Argumentos silogísticos são aqueles que têm a forma:

premissa menor	→	(premissa específica, do tipo “X é um A”)
<u>premissa maior</u>	<u>→</u>	<u>(premissa geral, do tipo “todos os A^s são B^s”)</u>
conclusão	→	(implicação decorrente da assunção das duas premissas, do tipo “logo, X é um B”.)

Com esta forma de apresentar os argumentos, os lógicos tradicionais, seduzidos pela sua simplicidade e seu caráter universal, queriam estabelecer a validade do argumento a partir da sua forma, visto que é a transformação formal que as premissas sofrem para se chegar à conclusão – reagrupando-se os termos das premissas no termo da conclusão – que garantiria tal validade (Toulmin, 1958/2006).

Com a finalidade de explicar as críticas de Toulmin ao silogismo de forma menos genérica e mais contextualizada em uma situação real de ensino será tomado como exemplo um argumento extraído de uma investigação realizada por Teixeira et al. (2010a) sobre uma intervenção de ensino de física com uso de abordagem contextual (orientado por história e filosofia da ciência) com objetivo de avaliar a qualidade da argumentação (baseada no *layout* de Toulmin) construída coletivamente pelos alunos, com mediação do professor, sobre a síntese newtoniana. O trecho do argumento a ser usado é o que está discutido no episódio IV do referido trabalho (ver Teixeira et al., 2010a: 74-75) que trata do obstáculo enfrentado por Newton para introduzir a noção de ação à distância quando propõe a idéia de uma força que atua sem contato entre os corpos, idéia esta que sofreu oposição por parte dos adversários contemporâneos de Newton.

O trecho do argumento construído coletivamente pelos alunos, com mediação do professor, será aqui reescrito para tornar mais clara a explanação das críticas de Toulmin à maneira silogística de argumentar. Ao reescrever o argumento – apresentado naquele trabalho em termos do *layout* de Toulmin – será feita uma redução do mesmo a uma forma silogística para, a partir de então, se explicitar as dificuldades encontradas nesta redução para analisar o argumento e, em tempo, se mostrar as vantagens da análise feita a partir do *layout* de Toulmin.

O argumento, expresso em termos do padrão de Toulmin, pode ser reescrito da seguinte forma: ⁽ⁱ⁾dado que a interação gravitacional entre os corpos é de natureza mecânica, ⁽ⁱⁱ⁾uma vez que forças mecânicas de interação podem ocorrer sem contato, ⁽ⁱⁱⁱ⁾o que está em acordo com os resultados dos cálculos

teóricos de Newton, ^(iv)conclui-se que as interações gravitacionais são de ação à distância. ^(v)Entretanto, se as forças mecânicas forem de contato, como pensavam os mecanicistas cartesianos, as interações gravitacionais não são de ação à distância.

O *layout* de Toulmin (1958/2006) permite distinguir os diferentes elementos do argumento, bem como as suas funções no mesmo. Assim, o trecho (i) deste argumento é identificado como o **Dado (D)**, a base factual a partir da qual se chega a uma asserção. O trecho (iv) representa a **Conclusão (C)**, a asserção feita a partir de **D** e cujos méritos se procura estabelecer. Entretanto, o **Dado**, por si só, não é suficiente para embasar a **Conclusão**, uma vez que se poderia questionar com legitimidade ‘o que garante que aquele **Dado** conduz àquela **Conclusão?**’ ou, de outra forma, ‘como se pode justificar o ‘passo’ de **D** para **C?**’ **Dados** adicionais não responderiam, posto que levariam a um processo de indução e não estariam isentos aos mesmos questionamentos. Deve-se, então, usar uma informação geral, hipotética que autorize o ‘passo’, ou seja, uma **Garantia (G)**. **D** e **G** têm funções distintas na estrutura do argumento. O primeiro tem a função de responder à pergunta ‘que informação factual se tem à disposição para se chegar à **C?**’ e o segundo tem a função de responder à pergunta ‘como se pode chegar a **C** a partir de **D?**’ ou ‘que idéia geral autoriza este passo?’ No exemplo, essa idéia geral está expressa no trecho (ii). **Garantias**, portanto, são gerais e incluem, na mesma categoria do argumento em questão, os **Dados** que são específicos, factuais. No exemplo, a categoria das forças mecânicas inclui a interação gravitacional e a proposição geral de que as forças mecânicas podem ocorrer à distância inclui o caso específico da interação gravitacional por esta ser mecânica.

Contudo, pode-se questionar também a autoridade de uma **Garantia**, se esta é aceitável enquanto idéia geral. Aquilo que avaliza a legitimidade de uma **Garantia**, que autoriza uma **Conclusão** a partir de um **Dado**, é o **Fundamento (F)**. **F**, portanto, é o apoio necessário (uma credencial) para se estabelecer **G** e pode ser de natureza legal, taxionômica, estatística etc., ou seja, é dependente do campo de conhecimento no qual se está argumentando (Toulmin, 1958/2006). Diferente das afirmações gerais contidas em **G**, o **Fundamento** traz informações categóricas de fato. No caso de uma argumentação científica, **F** pode ser encontrado em busca aos cânones da ciência específica da qual trata o argumento (leis e teorias largamente aceitas pela comunidade científica), diferentemente da **Garantia** que se trata de idéias genéricas que não estão presentes nos mesmos cânones. No exemplo, **F** está representado no trecho (iii).

Para completar o argumento é preciso deixar claro o grau de força da conclusão obtida através de algum termo **Qualificador (Q)** como, por exemplo, ‘necessariamente’, ‘provavelmente’, ‘possivelmente’, ‘supostamente’, dentre outros. **Q** é uma condição específica no argumento e indica o limite em que se pode considerar como válida a **Conclusão**. No exemplo, não aparece explícito nenhum **Qualificador**. Também é necessário explicitar as condições de exceção que funcionam como um **Refutador (R)** segundo o qual a **Garantia** deixa de ser válida e, portanto, não pode autorizar a **Conclusão** a partir do **Dado**. No exemplo, **R** está expresso no trecho (v). Assim, pode resumir a

estrutura de um argumento na forma: **W**, uma vez avalizado por **F**, autoriza **C**, obtida a partir de **D**, sendo considerado que **Q**, a menos que **R** (Toulmin, 1958/2006).

Usando-se essa estrutura como instrumento de análise é possível, portanto, identificar os elementos constituintes do argumento presentes na argumentação construída pelos alunos, com mediação do professor, e, na medida do possível, avançar na análise identificando a função que cada elemento exerce no argumento diminuindo a possibilidade de ambiguidades na análise. Isto foi corroborado na investigação empírica de Teixeira et al. (2010a).

Por outro lado, seguindo a crítica de Toulmin aos lógicos formais, pode-se fazer uma tentativa de reduzir o argumento à forma silogística, assim, o mesmo poderia ser expresso como segue:

a interação gravitacional é mecânica	→	(premissa menor)
<u>interações mecânicas ocorrem à distância</u>	→	(premissa maior)
logo, a interação gravitacional é de ação à distância	→	(conclusão)

Toulmin (1958/2006) faz uma crítica ao silogismo mostrando que esta forma de argumentar é muito simplificada e esconde certas complexidades inerentes ao argumento que são importantes para a sua análise e, com isto, omite também os próprios defeitos e limitações do modo silogístico de argumentar comprometendo a validade do argumento.

A forma silogística, que não explicita aqueles elementos do argumento, acaba por classificar equivocadamente como premissa maior aquilo que estaria expresso na **Garantia** e no **Fundamento**; e com isso esconde as diferenças importantes entre tais elementos, bem como as suas funções no argumento, tratando como iguais, coisas que têm natureza e função diferentes na estrutura do argumento (Toulmin, 1958/2006).

A premissa maior 'interações mecânicas ocorrem à distância' poderia ser interpretada em termos de **Garantia**, ou seja, de uma idéia geral de que as interações mecânicas ocorrem sem contato, de forma a autorizar o passo que vai do fato de que a interação gravitacional é de natureza mecânica para a conclusão de que a interação gravitacional é de ação à distância, sem explicitar o apoio para isto. Neste caso, as premissas implicam necessariamente a conclusão e o argumento é formalmente válido. Por outro lado, esta premissa também poderia ser interpretada em termos de **Fundamento**, ou seja, de que os resultados dos cálculos teóricos de Newton sustentam que sendo, de fato, a interação gravitacional de natureza mecânica, esta interação é de ação à distância; portanto, a premissa maior pode servir como um apoio, mesmo sem uma garantia declarada. Contudo, neste caso, as premissas não implicam necessariamente a conclusão e o argumento não é formalmente válido. Tem-se, então, uma ambiguidade no resultado da análise do argumento: ele pode ser ou não ser formalmente válido. Portanto, conforme Toulmin (1958/2006), a não explicitação da natureza e da função da premissa maior na forma silogística de apresentar o argumento conduz a uma ambiguidade na sua interpretação (ver figura 1).

Um ponto importante nesta crítica de Toulmin diz respeito à “campo-invariância” quanto à forma do argumento (que constitui a ‘força’ dos argumentos analíticos expressa na **Garantia**) e à “campo-dependência” quanto ao conteúdo do argumento (que constitui a solidez dos argumentos substanciais expressa no **Fundamento**). A forma lógica tradicional “todos os A^s são B^s”, que exprime a premissa geral em um silogismo, contribui para ocultar a distinção entre argumentos analíticos e substanciais (Toulmin, 1958/2006).

Se, em um silogismo, a premissa geral for expressa em termos de **Garantia** – por exemplo, nas formas “um A é, certamente, um B” ou “pode-se assumir que um A é um B”² – as duas premissas (geral e específica) implicam necessariamente na conclusão e o argumento, portanto, é formalmente válido (a conclusão está presente nas premissas). Este tipo de argumento é denominado de argumento analítico. A ‘força’ do argumento (estabelecida através da **Garantia**) é dada pela sua forma e esta, por sua vez, é válida para qualquer campo de conhecimento, logo, é “campo-invariante”. Assim sendo, o argumento analítico foi acatado paradigmaticamente pelos lógicos formais como um critério universal de juízo de argumentação em qualquer campo.

Por outro lado, se a premissa geral for expressa em termos de **Fundamento** – por exemplo, na forma “foram registrados tantos % de A^s que são B^s” ou “foi estabelecido por lei que determinados A^s são B^s”³ – as duas premissas não implicam necessariamente na conclusão e o argumento não é formalmente válido (a conclusão não é oriunda diretamente de um rearranjo textual das premissas). Este tipo de argumento é chamado de argumento substancial e a sua ‘força’ não é dada pela sua forma (já que o argumento não é formalmente válido) e sim pela solidez das informações expressas no **Fundamento**, que são próprias de cada campo de conhecimento. Cada campo estabelece seus fundamentos, e argumentos oriundos de diferentes campos requisitam diferentes fundamentos, logo o argumento é “campo-dependente”. Assim, para Toulmin, não se sustenta a idéia de que a validade de um argumento dependa apenas das suas propriedades formais e ele rejeita qualquer critério universal de juízo na argumentação prática. O argumento para ser legítimo não precisa ser estritamente necessário, conclusivo, definitivo e quem define os critérios de validação de um argumento é a própria comunidade especializada em cada campo. As categorias do argumento, portanto, são avaliadas por tais critérios.

O silogismo peca por não permitir explicitar a distinção entre os diferentes tipos de argumento. Nas palavras do próprio Toulmin:

“A menos que tenhamos o trabalho de expandir essas afirmações, de modo que se possa ver se afirmam garantias ou o apoio para as garantias, não há como

² Nota-se aqui que diferentes formas estabelecem diferentes ‘forças’ ao argumento. No primeiro caso, uma forma mais forte e no segundo, uma forma mais branda. A Garantia, portanto, serve para estabelecer a ‘força’ do argumento (Toulmin, 1958/2006).

³ Nota-se aqui que a ‘força’ do argumento não é dada pela sua forma, mas pela solidez do conteúdo específico de cada campo de conhecimento (estatística, direito etc.) (Toulmin, 1958/2006).

perceber a grande variedade de argumentos que se apresentam sob a forma silogística tradicional; temos de explicitar a distinção entre apoio e garantia, em qualquer caso específico, se quisermos ter certeza sobre que tipo de argumento estamos trabalhando." (Toulmin, 1958/2006: 179).

O modelo tradicional é mais simples que o layout de Toulmin, mas esta simplicidade é perigosa, pois não dá conta de avaliar apropriadamente os argumentos em diversos campos distintos. Da mesma forma, não se sustenta a idéia de que todas as espécies de argumento têm de ser submetidas a este mesmo padrão de análise. A seguir, na figura 1, apresenta-se uma síntese da discussão precedente e da ambigüidade trazida pelo silogismo na análise do argumento.

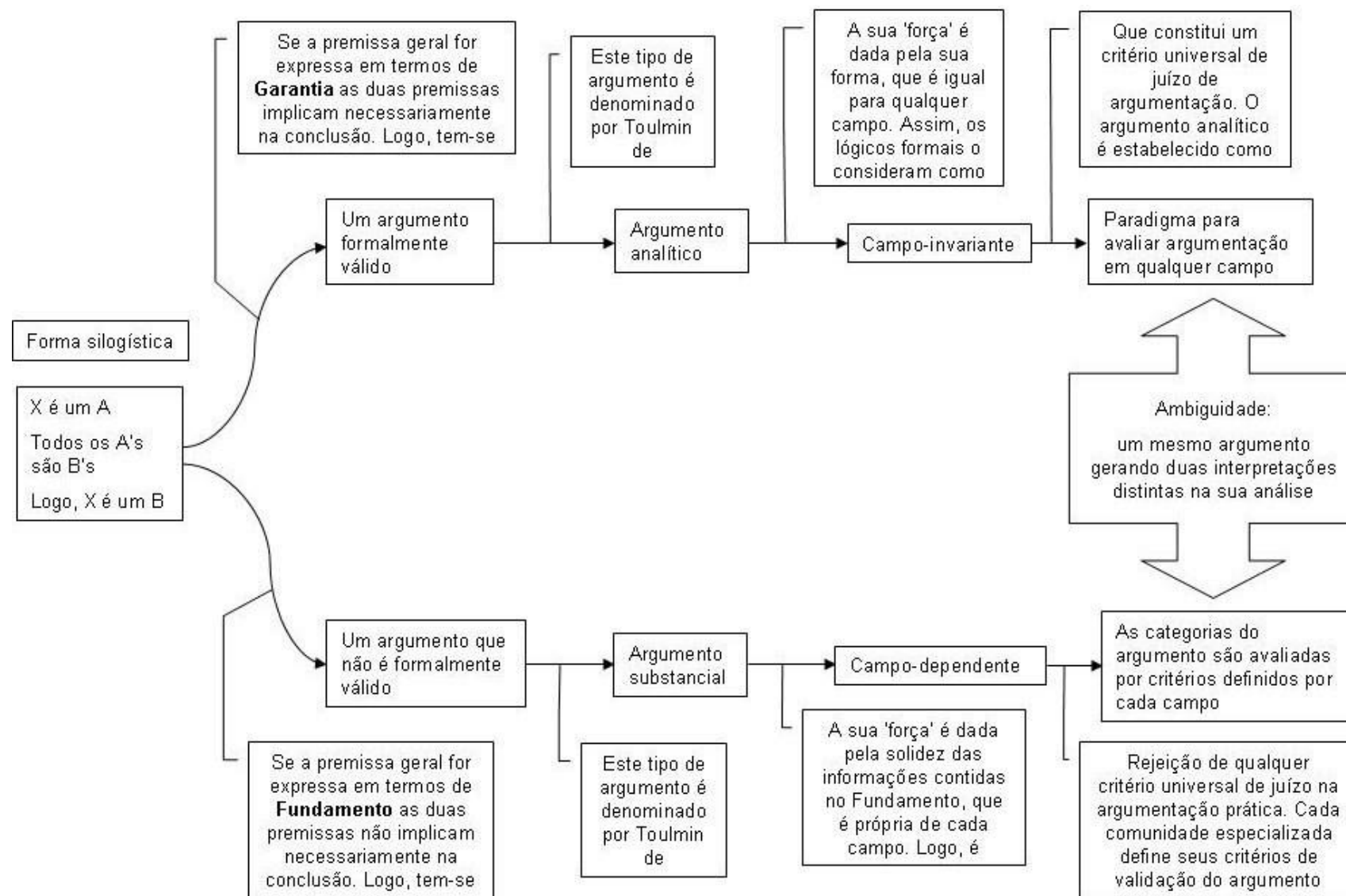


Figura 1 – Ambiguidade trazida pelo silogismo na análise do argumento.

Uma Proposta Didática

Conforme afirmam Stamovlasis et al. (2006), uma das áreas mais férteis da pesquisa em ensino nas últimas décadas são aquelas voltadas para investigar as estratégias de ensino desenvolvidas de modo a promover atividades em que os alunos são conduzidos a trabalhar em pequenos grupos com vistas a compartilhar determinadas metas de aprendizagem, e os resultados desta linha de pesquisa têm propiciado evidências significativas indicando a eficácia deste tipo de estratégia, no que diz respeito às performances dos alunos, quando comparadas com estratégias focadas em atividades individuais. Os autores ainda acentuam que as estratégias que promovem atividades em grupos têm sido amplamente utilizadas em salas de aula e com uma grande diversidade de maneiras em todos os níveis de ensino.

As estratégias de ensino voltadas para a promoção de atividades em grupos, de um modo geral, são embasadas em teorias psicológicas, tais como a teoria de Lev Vigotski que concebia a idéia de que o conhecimento é construído pelo sujeito através de um processo de interação social (Stamovlasis et al., 2006; Rego, 2000; Vigotski, 1934/2001). Segundo esta visão, o Homem é compreendido como um ser social que interfere e é influenciado pelo meio através da sua interação com o mesmo e, assim, se desenvolve e se constitui como Homem. As ações que os seres humanos desenvolvem em grupos sociais são reconstruídas internamente produzindo desenvolvimento e conhecimento no indivíduo, ou seja, há um processo de transformação que vai desde processos externos, intersubjetivos, a um processo interno, intrasubjetivo, logo na direção do social para o individual (Rego, 2000).

Desta forma, *“na perspectiva de Vigotski, construir conhecimentos implica uma ação partilhada, já que é através dos outros que as relações entre sujeito e objeto de conhecimento são estabelecidas”* (Rego, 2000: 107).

Segundo Vigotski, é dos processos de interação social que se originam, portanto, o desenvolvimento mental e a aprendizagem. Assim, ele formula o conceito de Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP) que é *“a distância entre o nível de desenvolvimento real, que se costuma determinar através da solução independente de problemas, e o nível de desenvolvimento potencial, determinado através da solução de problemas sob a orientação de um adulto ou em colaboração com companheiros mais capazes”*. (Vigotski, 2000: 112).

Este conceito estabelece que a aprendizagem depende externamente do desenvolvimento mental e está sempre atrás deste, ou seja, somente se consegue atingir determinado estágio de aprendizagem depois que se conseguir atingir determinado estágio do desenvolvimento em grau correspondente, grau necessário para que a aprendizagem seja possível. Nas palavras do próprio Vigotski, *“a aprendizagem é caudatária do desenvolvimento. O desenvolvimento deve completar determinados ciclos, deve concluir determinados estágios para que a aprendizagem se torne viável”*. (Vigotski, 1934/2001: 298-299). E a interação do sujeito com os outros (colegas e professor, por exemplo) através de atividades coletivas é fundamental *“tanto na criação do desenvolvimento proximal quanto na transformação do*

desenvolvimento proximal em real.” (Góes, 2001: 82), ou seja, na transformação dos aspectos intersubjetivos em intrasubjetivos.

Assumindo esta perspectiva dentro do contexto educacional, se é inevitavelmente conduzido a uma direção na qual, para que haja desenvolvimento cognitivo e conhecimento (aprendizagem) por parte dos alunos de forma satisfatória é necessário o envolvimento dos mesmos em atividades coletivas que promovam argumentação através do diálogo, discussão, confronto de idéias, colaboração, compartilhamento de funções e responsabilidades, de forma que haja interação social entre os alunos para a construção e compartilhamento de conhecimentos (Rego, 2000).

Driver et al. (2000), por sua vez, afirmam a necessidade de desenvolver instrumentos que possam analisar e propiciar melhorias no discurso argumentativo dos estudantes e que, para isto, tais instrumentos precisam: promover intervenções orientadas para melhorar a qualidade da argumentação; orientar os professores quanto a como mediar os argumentos dos estudantes; ajudar os estudantes a atentarem para a natureza e a estrutura dos argumentos; avaliar os argumentos dos estudantes para monitorar seu progresso.

Neste sentido, toma lugar a presente proposta didática que, para além das razões teóricas já apontadas na introdução deste trabalho, se justifica também pelos resultados empíricos encontrados na aplicação de uma proposta didática com uso de abordagem contextual visando avaliar a qualidade da argumentação dos alunos da Licenciatura Noturna em Física da UFBA (ver Teixeira et al., 2010a). Os autores mostraram que a intervenção didática que foi feita, através da discussão em grupos e entre os grupos, propiciou a construção de uma argumentação coletiva satisfatória sobre a síntese newtoniana e que a abordagem contextual exerceu um papel fundamental para isto; que o *layout* de Toulmin foi eficaz para analisar a qualidade da argumentação construída coletivamente pelos sujeitos da pesquisa; e, ainda, que foram percebidas algumas limitações da intervenção didática a exemplo da ausência do levantamento das concepções prévias dos alunos, o que conduziu os autores, como uma forma de aprimoramento, a desenvolver a presente proposta didática que será, em seguida, descrita de maneira mais pormenorizada.

O objetivo geral da proposta é apresentar uma estratégia de ensino da gravitação universal de Newton, orientada pela história e filosofia da ciência, com um enfoque na construção coletiva de uma argumentação sobre a gravitação universal de Newton. Pretende-se, como objetivos específicos, que a proposta possa contribuir com o ensino de física em relação aos seguintes aspectos:

(i) propiciar aos alunos uma noção geral do papel da argumentação na ciência e apresentar o *layout* de argumentação de Toulmin (seus elementos constitutivos e as funções que exercem no argumento como um todo) como um bom exemplar de estrutura para elaborar e avaliar um argumento com qualidade;

- (ii) discutir o tema gravitação universal de Newton a partir de uma narrativa histórica que contrapõe as interpretações de dois dos principais especialistas em estudos Newtonianos, sobre os caminhos científicos de Newton em direção à gravitação universal;
- (iii) discutir o papel da experiência de pensamento da ‘queda da Lua’ realizada por Newton na corroboração da idéia de ação à distância que o conduziu posteriormente à gravitação universal;
- (iv) discutir, em termos gerais, o papel da gravitação universal de Newton para se compreender a síntese newtoniana;
- (v) apresentar, em primeira mão, os materiais didáticos “Os Caminhos de Newton para a Gravitação Universal: Uma Revisão do Debate Historiográfico entre Cohen e Westfall” (ver Teixeira et al., 2010b) e “Argumentação no Ensino de Ciências: O *Layout* de Toulmin” (seção anterior do presente trabalho), elaborados para auxiliar no cumprimento dos objetivos acima, e que serão usados conjuntamente com os materiais (Toulmin, 1958/2006), (Kuhn, 1993) e (Freire et al., 2004);
- (vi) propiciar aos alunos uma oportunidade de trabalhar em grupos para produzir uma argumentação coletiva sobre a gravitação universal de Newton.

A proposta é inicialmente voltada para ser implementada em disciplinas de física em nível superior⁴ que tratam os assuntos da física newtoniana, em particular, a gravitação universal, e que usam como abordagem de ensino a história e filosofia da ciência, ou seja, disciplinas baseadas em abordagem contextual de ensino de física⁵ (conforme denomina Matthews, 1994). A proposta foi planejada para ser realizada em uma sequência didática de 12 aulas considerando a duração de cada aula de 50 minutos. Esta sequência é constituída de uma série de atividades que incluem exposição e discussão dos temas, discussões em pequenos grupos de alunos e discussões entre os grupos com mediação do professor (conforme está sintetizado no esquema adiante), dentro da perspectiva sócio-interacionista de Vigotski discutida acima. É essencial que todas estas atividades sejam precedidas de leituras dos textos sugeridos e fornecidos previamente pelo professor para que os alunos leiam ‘em casa’, ou seja, antes de cada aula e, assim, possam estar preparados para uma discussão sobre os mesmos; bem como, é fundamental também que seja feito, pelo professor, o levantamento das concepções prévias dos alunos tanto em relação ao conteúdo quanto em relação aos aspectos sobre a natureza da ciência.

As duas primeiras aulas são destinadas a discutir com os alunos o papel da argumentação na ciência e a importância deles aprenderem a elaborar apropriadamente um argumento científico, bem como saberem avaliar um argumento desta natureza. Para isto, o *layout* de Toulmin é apresentado e discutido através de três textos: o capítulo três do livro do próprio Toulmin (1958/2006), no qual o autor apresenta seu *layout* de argumentação identificando seus elementos constitutivos e suas funções no argumento; o

⁴ Com as devidas adaptações e ajustes parece ser possível, em princípio, que a proposta seja viável em aulas de física no nível médio. Contudo, isto não será tratado no presente trabalho.

⁵ Exemplos de disciplinas com esta natureza são: “Física Básica I” (Licenciatura Noturna em Física da UFBA); “Fundamentos de Física” (Licenciatura e Bacharelado em Física da UEFS); “Evolução dos Conceitos da Física” (Licenciatura e Bacharelado em Física da UFSC).

artigo da Deanna Kuhn (1993), no qual ela aborda a relação entre argumento e pensamento científico discutindo o papel da ciência enquanto argumento; e o texto “Argumentação no Ensino de Ciências: O *Layout* de Toulmin”, que constitui a seção anterior do presente trabalho e que foi elaborado para fazer parte desta sequência didática como forma de auxiliar os alunos no entendimento do *layout* de Toulmin, bem como entender as razões que o levou a propor a sua forma de estruturar um argumento em contraposição à forma que havia sido proposta pelos lógicos tradicionais.

As duas aulas seguintes (aulas 3 e 4) são dedicadas à discussão sobre os processos científicos que conduziram Newton à gravitação universal. A idéia aqui é discutir os estágios de desenvolvimento do pensamento de Newton sobre a mecânica celeste nos quatro principais momentos em que ele tratou desta temática: os *anni mirabili* (1665/1666), a correspondência com Hooke (1679/1680), o tratado *De Motu* (1684) e o *Principia* (1687). São confrontadas as posições de Cohen e Westfall sobre: o *delay* de 20 anos para Newton anunciar a lei da gravitação universal; o papel das leis de Kepler na dedução da lei; a influência do conceito de ‘tendência centrífuga’ de Descartes; as transformações de pensamento em Newton quanto ao conceito de força; a dívida de Newton a Hooke; a discussão realismo versus instrumentalismo; a controvérsia sobre a demonstração do ‘problema de Halley’ inverso; e a função da terceira lei de Newton na construção da sua dinâmica planetária. Ainda, são apresentadas as treze primeiras proposições da seção II, Livro I do *Principia*, com destaque para a Proposição IV em que ‘abre-se’, em linguagem matemática contemporânea, as contas nela implícitas.

Todos estes aspectos são discutidos no texto de Teixeira et al. (2010b) que foi elaborado, em princípio, para ser usado nesta proposta didática. A opção por este material didático advém, em primeiro momento, da insatisfação dos autores quanto à forma como a gravitação universal de Newton tem sido apresentada nos livros didáticos, inclusive aqueles que usam abordagens históricas para apresentar o conteúdo, e tal opção é sustentada teoricamente pelas possíveis implicações que pode trazer para o ensino da gravitação universal de Newton, conforme está discutido na seção final do próprio texto. No mesmo, se discute as contribuições do debate historiográfico entre Cohen e Westfall para o ensino da gravitação universal de Newton sob vários aspectos: (i) a imagem de ciência que pode ser propiciada aos estudantes ao explicitar que Newton desenvolveu este conhecimento por um longo processo de transformação de pensamento e com a contribuição de outros estudiosos – os conceitos inicialmente equivocados de força e os primeiros cálculos errados do ‘teste da Lua’ são exemplos disso. As diferenças nas interpretações de Cohen e Westfall sobre a relação de Newton com o conceito de força e o mundo real são propícias para uma discussão epistemológica sobre realismo e instrumentalismo em sala de aula; (ii) a discussão sobre a dificuldade de Newton na elaboração da dinâmica orbital antes de compreender os conceitos de inércia e de força centrípeta explicita a importância pedagógica do entendimento destes conceitos com vistas à compreensão da gravitação universal. A dedução matemática da lei da gravitação universal de Newton, conforme apresentada em alguns livros didáticos, leva à ‘aceitação’ do resultado sem uma devida compreensão conceitual. A reconstrução histórica

presente no debate historiográfico pode ajudar a solucionar esta dificuldade; (iii) o debate historiográfico pode propiciar, ainda, uma melhor habilidade de argumentação nos estudantes em função de envolvê-los em atividades discursivas sobre controvérsias científicas (Teixeira et al., 2010b).

Na presente proposta didática, a discussão sobre este tema é feita através de atividades em pequenos grupos de quatro ou cinco alunos. Após a leitura do texto, que deve ser feita antes das aulas, os alunos se reúnem em grupos para discutir o tema, orientados por um questionário (anexo A) fornecido pelo professor, no qual constam itens sobre pontos importantes em relação aos assuntos supracitados. Com isso, espera-se que os alunos possam desenvolver uma compreensão sobre o tema para discutir com os demais grupos, nos termos do conceito de ZDP de Vigotski.

Nas duas aulas que seguem (aulas 5 e 6), é feita uma discussão aberta entre os grupos sobre o mesmo tema. Cada grupo faz uma breve apresentação expondo as principais idéias e conclusões oriundas da discussão feita em seu grupo nas duas aulas anteriores. A discussão é aberta no sentido em que todos os grupos podem interferir complementando ou discordando das posições de outro grupo.

O professor deve desempenhar um papel fundamental como mediador da discussão controlando as intervenções dos grupos, fazendo questões para cada grupo com vistas a permitir o aprimoramento das respostas ou intervenções e interferindo, quando for necessário, com uso da autoridade do discurso da ciência para dirimir as dúvidas e fazer um desfecho da discussão, produzindo, assim, padrões de interação triádicas e não-triádicas (ver Mortimer e Scott, 2002) e conduzindo intencionalmente as atividades através de uma abordagem comunicativa, cujas interações em sala de aula venham a oscilar desde o tipo Interativo/Dialógica para Interativo/de Autoridade para Não-Interativo/de Autoridade, conforme encontrado em Teixeira et al. (2010a) e em Mortimer e Scott (2002). Ao final da atividade deve ser produzida uma argumentação, segundo a forma do *layout* de Toulmin, a partir das contribuições dos grupos e medição do professor, sobre o tema.

Na sequência, ocorrem mais duas aulas (aulas 7 e 8) dedicadas à discussão em grupos (preferencialmente, os mesmos grupos das aulas 3 e 4) sobre a experiência mental da “queda da Lua” de Newton (conhecida também como o “teste da Lua”) e o seu papel na elaboração da gravitação universal. A idéia aqui é discutir a demonstração feita por Newton, que constitui a Proposição IV do Livro III do *Principia*, e que foi traduzida e discutida por Freire et al. (2004). Trata-se de uma interessante experiência de pensamento na qual Newton supõe a Lua caindo em direção à Terra, calcula a aceleração centrípeta da Lua em sua órbita e em seguida converte – admitindo uma proporcionalidade com o inverso do quadrado do raio da órbita – o valor dessa aceleração para uma distância entre a Lua e a Terra equivalente a um raio terrestre; daí, ele compara com a aceleração de um corpo na superfície da Terra devido à sua gravidade, isto é, em queda livre; e chega a resultados suficientemente próximos para concluir que se trata da mesma aceleração, logo da mesma força que, mais adiante, ele irá denominar de gravidade. A atividade é

desenvolvida nos mesmos moldes das aulas 3 e 4 e é orientada por um questionário (anexo B), fornecido pelo professor e que contém os principais pontos de discussão sobre o tema. Com isso, espera-se que os alunos possam ter uma compreensão sobre o tema para posterior discussão coletiva com os demais grupos, nos termos do conceito de ZDP de Vigotski.

Nas aulas 9 e 10 é feita uma discussão aberta entre os grupos sobre o tema acima descrito, nos mesmos moldes das aulas 5 e 6. Ao final desta atividade deve ser produzida uma argumentação coletiva sobre o papel da experiência da “queda da Lua” na elaboração da gravitação universal de Newton, segundo a forma do *layout* de Toulmin, a partir das contribuições dos grupos e a medição do professor.

A aula 11 é conduzida pelo professor para expor, abrindo espaço para intervenções dos alunos, uma conclusão geral sobre a gravitação universal de Newton e seu significado para a síntese newtoniana, fazendo um arremate dos argumentos construídos coletivamente nas atividades anteriores, em uma interação do tipo Interativo/de Autoridade. Em seguida, a aula 12 tem o objetivo de fazer uma avaliação das atividades desenvolvidas nesta sequência didática. Neste momento os alunos devem se reagrupar para produzir uma representação das suas conclusões finais acerca dos temas trabalhados nas atividades anteriores, através do *layout* de argumentação de Toulmin, o que permitirá avaliar a qualidade da argumentação produzida coletivamente pelos grupos com a mediação do professor.

Esquema da Sequência Didática

Aulas*	Tema	Atividade	Objetivo	Material utilizado
Aula 1	Ciência e argumentação	Exposição e discussão do tema com os alunos, após leitura prévia (em casa) dos textos recomendados pelo professor	Discutir com os alunos o papel da argumentação na ciência	Textos** 1 e 2, que discutem a natureza argumentativa da ciência
Aula 2	O <i>layout</i> de argumentação de Toulmin	Exposição e discussão do tema com os alunos, após leitura prévia (em casa) dos textos recomendados pelo professor	Apresentar o <i>layout</i> de Toulmin como padrão de qualidade para construção de um bom argumento	Textos** 1, 2 e 3, que apresentam e discutem o <i>layout</i> de argumentação de Toulmin
Aulas 3 e 4	Os caminhos de Newton para a gravitação universal	Discussão do tema pelos alunos em grupos de quatro ou cinco, após leitura prévia (em casa) do texto recomendado pelo professor; a discussão é orientada por um questionário indicado pelo professor com importantes pontos de discussão sobre o tema	Propiciar aos alunos discutirem internamente (em pequenos grupos) com vistas a uma compreensão sobre o tema e posterior contribuição na construção de uma argumentação coletiva sobre os passos de Newton para a gravitação universal	Texto** 4; questionário para orientar a discussão
Aulas 5 e 6	Os caminhos de Newton	Discussão do tema entre os grupos; faz-se uma	Produzir uma argumentação construída	Texto** 4; questionário para

	para a gravitação universal	discussão geral, mediada pelo professor, em que cada grupo apresenta suas conclusões oriundas da discussão da atividade anterior, bem como se posiciona frente às conclusões dos demais grupos	coletivamente sobre o tema, a partir da contribuição dos grupos	orientar a discussão
Aulas 7 e 8	A experiência da “queda da Lua” de Newton	Discussão do tema pelos alunos em grupos de quatro ou cinco (os mesmos grupos da aula anterior), após leitura prévia (em casa) do texto recomendado pelo professor; a discussão é orientada por um questionário indicado pelo professor com importantes pontos de discussão sobre o tema	Propiciar aos alunos discutirem internamente (em pequenos grupos) com vistas a uma compreensão sobre o tema e posterior contribuição na construção de uma argumentação coletiva sobre o papel da experiência da “queda da Lua” na elaboração da gravitação universal de Newton	Texto** 5; questionário para orientar a discussão
Aulas 9 e 10	A experiência da “queda da Lua” de Newton	Discussão do tema entre os grupos; faz-se uma discussão geral, mediada pelo professor, em que cada grupo apresenta suas conclusões oriundas da discussão da aula anterior, bem como se posiciona frente às conclusões dos demais grupos	Produzir uma argumentação construída coletivamente sobre o tema, a partir da contribuição dos grupos	Texto** 5; questionário para orientar a discussão
Aula 11	A gravitação universal e a síntese newtoniana	Conclusão geral das discussões anteriores com exposição pelo professor e discussão com os alunos do significado da gravitação universal para a síntese newtoniana	Fazer um arremate dos argumentos construídos coletivamente e um apresentar um desfecho do tema	
Aula 12	Avaliação	Avaliação em grupos das atividades anteriores a partir do <i>layout</i> de Toulmin; os alunos se reagrupam para produzir uma representação das suas conclusões finais acerca das atividades anteriores, através do <i>layout</i> de Toulmin	Fazer uma avaliação sobre a qualidade dos argumentos produzidos pelos grupos	Representações diagramáticas (por meio do <i>layout</i> de Toulmin) dos argumentos elaborados pelos grupos

* Considera-se cada aula com duração de 50 min.

**Textos: 1 - Toulmin (1958/2006); 2 - Kuhn (1993); 3 - “Argumentação no Ensino de Ciências: O *Layout* de Toulmin” (seção anterior do presente trabalho); 4 - Teixeira et al. (2010b); 5 - Freire et al. (2004)

Considerações Finais

A presente proposta didática se baseia na idéia de que os alunos devem aprender a argumentar e saber avaliar um argumento científico para se familiarizar com o gênero do discurso científico e, assim, possam estar melhor habilitados para compreender o conteúdo científico (em particular, referente à gravitação universal de Newton); e também possam ter uma melhor apreciação acerca da natureza da ciência e como ela é produzida pela comunidade científica. Para isto, são reiteradas as vantagens pedagógicas do uso do *layout* de Toulmin como modelo apropriado para se elaborar e avaliar uma argumentação. A proposta oferece uma alternativa de como fazer uso da história e filosofia da ciência em salas de aula de física para tratar do tema gravitação universal de Newton com a perspectiva de propiciar a habilidade dos alunos em construir coletivamente uma argumentação sobre este assunto.

Entretanto, assim como qualquer proposta didática, esta também apresenta algumas limitações. Uma destas limitações diz respeito ao fato de que, em função de focar na construção de um argumento coletivo, a proposta não dá conta de avaliar os aspectos cognitivos individuais dos alunos; se houve ou não algum ganho em termos de aprendizagem individual e, caso tenha havido, em que medida isto veio a acontecer.

Outra limitação diz respeito ao tempo estabelecido para a realização da proposta na íntegra. Como se trata de uma sequência didática de 12 aulas de 50 minutos cada, para ser implementado como parte do programa de um tipo de disciplina que, caracteristicamente tem 68 aulas na média geral, isto pode representar dispor uma parte significativa do programa da disciplina para tratar de um único assunto, a gravitação universal, e com isto deixar pouco tempo disponível para os demais assuntos da mesma. Por outro lado, isto pode ser justificado pela relevância do assunto para se compreender o significado da síntese newtoniana e a mudança na visão de mundo que esta síntese propiciou na sociedade no século XVII, conforme acentua Kuhn (1990).

Adicionalmente, há as limitações dos próprios instrumentos teóricos usados como suporte para fundamentar a proposta didática, tais como, as dificuldades decorrentes de se usar didaticamente a história e filosofia da ciência em sala de aula com vistas a alcançar ganhos cognitivos, visto que a literatura especializada não apresenta consenso quanto a este aspecto (ver Teixeira et al., 2009). Por outro lado, estes autores afirmam também que há uma necessidade de maiores esforços para implementação e investigação de propostas voltadas para avaliar os efeitos do uso didático de história e filosofia da ciência na capacidade de argumentação dos alunos (Teixeira et al., 2009). Neste sentido, a presente proposta oferece uma contribuição. Também aparecem limitações em relação ao *layout* de Toulmin que, conforme Clark et al. (2007), com frequência apresenta dificuldades para se fazer a diferenciação entre dados, garantias e fundamentos ao se avaliar um argumento na prática. Segundo Driver et al. (2000), este modelo também apresenta limitações no que se refere a não considerar como se dão as relações sociais entre os membros dos grupos em sua atividade de desenvolver um argumento.

Por fim, a despeito de tais limitações, deve-se salientar que a presente proposta procura atender à superação das dificuldades encontradas na análise feita por Teixeira et al. (2010a), na disciplina 'Física Básica I' da Licenciatura Noturna em Física da UFBA, visando aprimorar a intervenção didática. Alguns desses aprimoramentos podem ser destacados, tais como: a consideração das concepções prévias tanto sobre o assunto quanto sobre a história e filosofia da ciência; o uso dos materiais instrucionais Teixeira et al. (2010b) e "Argumentação no Ensino de Ciências: O *Layout* de Toulmin" (que constitui a segunda seção do presente trabalho) elaborados especialmente para serem utilizados como auxiliares para a realização da proposta; a discussão explícita sobre o papel da argumentação na ciência e a apresentação contextualizada do modelo de Toulmin; e a idéia de ensinar os alunos a elaborar e avaliar apropriadamente um argumento científico com o uso deste modelo.

Referências

- ABI-EL-MONA, I.; ABD-EL-KHALICK, F. (2006). Argumentative Discourse in a High School Chemistry Classroom. *School Science and Mathematics*, 106(8), 349-361.
- CAPECCHI, M. C. V.; CARVALHO, A. M. P. (2000). Argumentação em uma Aula de Conhecimento Físico com Crianças na Faixa de Oito a Dez Anos. *Investigações em Ensino de Ciências*. 5(3), 171-189.
- CARVALHO, A. M. P.; VANNUCCHI, A. I. (1996). O Currículo de Física: Inovações e Tendências nos Anos Noventa. *Investigações em Ensino de Ciências*, 1(1), 3-19.
- CLARK, D. B.; SAMPSON, V.; WEINBERGER, A.; ERKENS, G. (2007). Analytic Frameworks for Assessing Dialogic Argumentation in Online Learning Environments. *Educational Psychology Review*, 19(3), 343-374.
- DRIVER, R.; NEWTON, P.; OSBORNE, J. (2000). Establishing the Norms of Scientific Argumentation in Classrooms. *Science Education*, 84(3), 287-312.
- ERDURAN, S.; SIMON, S.; OSBORNE, J. (2004). TAPing into Argumentation: Developments in the Application of Toulmin's Argument Pattern for Studying Science Discourse. *Science Education*, 88(6), 915-933.
- FREIRE, O.; MATOS, M.; VALLE, A. (2004). Uma Exposição Didática de Como Newton Apresentou a Força Gravitacional. *Física na Escola*, 5(1), 25-31.
- GÓES, M. C. R. (2001). A Construção de Conhecimentos e o Conceito de Zona de Desenvolvimento Proximal. In: MORTIMER, E. F. e SMOLKA, A. L. B. (Orgs.). *Linguagem, Cultura e Cognição: Reflexões para o Ensino e a Sala de Aula*. Belo Horizonte: Autêntica, pp. 77-88.
- GRIMES, W. (2009). Stephen Toulmin, a Philosopher and Educator, Dies at 87. *The New York Times* (Obituary), New York, December 11, 2009.
- JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, M.; RODRÍGUEZ, A.; DUSCHL, R. (2000). "Doing the Lesson" or "Doing Science": Argument in High School Genetics. *Science Education*, 84(6), 757-792.
- KUHN, D. (1993). Science as Argument: Implications for Teaching and Learning Scientific Thinking. *Science Education*, 77(3), 319-337.
- KUHN, T. S. (1990). *A Revolução Copernicana, a Astronomia Planetária no Desenvolvimento do Pensamento Ocidental*. Lisboa: Edições 70.

- NAYLOR, S.; KEOGH, B.; DOWNING, B. (2007). Argumentation and Primary Science. *Research in Science Education*. 37(1), 17-39, DOI: 10.1007/s11165-005-9002-5.
- MATTHEWS, M. (1994). *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*. New York: Routledge.
- MORTIMER, E.; SCOTT, P. (2002). Atividade Discursiva nas Salas de Aula de Ciências: Uma Ferramenta Sociocultural para Analisar e Planejar o Ensino. *Investigações em Ensino de Ciências*, 7(3), 283-306.
- MUNFORD, D.; ZEMBAL-SAUL, C. (2002). *Learning Science Through Argumentation: Prospective Teachers' Experiences in an Innovative Science Course*. Paper presented at the Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching (NARST), New Orleans, L.A., April (ERIC Document Reproduction Service nº ED 465 520).
- REGO, T. C. R. (2000). A Origem da Singularidade Humana na Visão dos Educadores. *Cadernos CEDES*, 35, 2ª edição.
- STAMOVLASIS, D.; DIMOS, A.; TSAPARLISA, G. (2006). Study of Group Interaction Processes in Learning Lower Secondary Physics. *Journal of Research in Science Teaching*. 43(6), 556–576.
- TEIXEIRA, E. S.; GRECA, I.; FREIRE, O. (2009). The History and Philosophy of Science in Physics Teaching: A Research Synthesis of Didactic Interventions. *Science and Education*, DOI 10.1007/s11191-009-9217-3.
- TEIXEIRA, E. S.; SILVA, C. P.; FREIRE, O.; GRECA, I. (2010a). A Construção de uma Argumentação sobre a Síntese Newtoniana a partir de Atividades em Grupos. *Investigações em Ensino de Ciências*, 15(1), 61-95.
- TEIXEIRA, E. S.; PEDUZZI, L. O. Q.; FREIRE, O. (2010b). Os Caminhos de Newton para a Gravitação Universal: Uma Revisão do Debate Historiográfico entre Cohen e Westfall. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27(2), 215-254.
- TOULMIN, S. (1958/2006). *Os Usos do Argumento*. Trad. Reinaldo Guarany. São Paulo: Martins Fontes.
- VIGOTSKI, L. (1934/2001). *A Construção do Pensamento e da Linguagem*. Tr. Paulo Bezerra. São Paulo: Martins Fontes.
- VIGOTSKI, L. (2000). *A Formação Social da Mente*. São Paulo: Martins Fontes.

Anexo A

Questionário (Os Caminhos de Newton para a Gravitação Universal)

1. Conforme Westfall e Cohen, quais obstáculos conceituais Newton enfrentou ao lidar com o conceito de força?
2. Em que aspectos, os estudos de Westfall e Cohen contribuem para mudar a imagem usual de que Newton formulou o cálculo, a mecânica e a força gravitacional durante os *anni mirabili*?
3. Qual o papel da terceira lei de Newton na dedução da lei de gravitação universal de Newton?

4. Por quais processos de transformação de pensamento Newton passou desde os *anni mirabili* até a elaboração da gravitação universal, segundo Cohen e Westfall?
5. Quais as dificuldades que Newton enfrentou em relação ao seu conceito de espaço absoluto quando aderiu ao conceito de inércia?
6. Mostre que tanto um movimento inercial quanto o movimento curvo de um corpo submetido a uma força central, obedecem à lei das áreas de Kepler. Discuta a importância desta lei para a dinâmica planetária de Newton.

Anexo B

Questionário (A Experiência da “Queda da Lua” de Newton)

1. Explique como Newton comparou a aceleração da Lua em sua órbita com a aceleração da gravidade na superfície da Terra. Quais os artifícios que ele utilizou para isso?
2. Que argumentos Newton utilizou para justificar a adoção de uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância?
3. Qual o principal obstáculo enfrentado por Newton para introduzir a idéia de uma força gravitacional de ação à distância? Que saída ele encontrou para minimizar o problema?
4. O que você entende por Síntese Newtoniana? Qual a importância e implicações desta síntese?
5. Que argumentos Newton utilizou para adotar o sistema Heliocêntrico?
6. A quais conclusões você chega sobre o trabalho de Newton depois da leitura do texto e da atividade em classe?

Capítulo 6

Conclusão e Considerações Finais

Conclusão e Considerações Finais

Este trabalho trata do enfrentamento do problema de pesquisa que visa avaliar a qualidade da argumentação produzida coletivamente sobre a síntese newtoniana em sala de aula de uma disciplina orientada por uma abordagem contextual de ensino, bem como o papel da história e filosofia da ciência nesta argumentação; e apresentar uma proposta didática para ensinar a gravitação universal de Newton, de forma orientada pela história e filosofia da ciência, com um enfoque em promover habilidade de argumentação aos alunos sobre o referido assunto.

Os subproblemas decorrentes objetivam: fazer uma revisão das pesquisas que investigam aplicações didáticas de ensino de física orientadas pela história e filosofia da ciência para conhecer o 'estado da arte' da área e orientar a proposta didática; elaborar um material instrucional sobre a gravitação universal de Newton de forma integrada com o processo de desenvolvimento histórico da mesma, visando seu uso na proposta didática; analisar a implementação em sala de aula da disciplina 'Física Básica I' da Licenciatura Noturna em Física da UFBA, de uma estratégia de ensino focada na construção coletiva de uma argumentação sobre a síntese newtoniana; desenvolver um material instrucional para apresentar o *layout* de argumentação de Toulmin de forma contextualizada, como um instrumento de elaboração e análise de um argumento, visando utilizá-lo na proposta didática; apresentar uma proposta didática com enfoque em promover maior habilidade de argumentação aos alunos sobre a gravitação universal de Newton a partir de uma abordagem contextual de ensino.

Assim, em coerência com a forma de múltiplos artigos escolhida para tratar deste problema e seus subproblemas, cada parte do trabalho foi desenvolvida como um estudo que tem uma certa independência, visando resolver um ou mais dos subproblemas; ao mesmo tempo, todos os estudos em conjunto se complementam, compondo o trabalho como um todo, visando, portanto, resolver o problema maior. Desta forma, foram desenvolvidos quatro trabalhos que correspondem aos capítulos dois a cinco da tese, cujas principais conclusões são sintetizadas a seguir.

A revisão realizada neste trabalho sobre a literatura publicada em língua inglesa que investiga os efeitos didáticos de intervenções em sala de aula que usam abordagem contextual de ensino de física, conforme os procedimentos que foram feitos sob o título de revisão sistemática, se mostrou bastante eficaz para se conhecer o 'estado da arte' desta área de investigação, permitindo traçar um panorama geral da mesma. Foi detectada uma relativa escassez de pesquisas empíricas sobre intervenções didáticas com uso de história e filosofia da ciência em salas de aula de física, embora, como ponto positivo, a grande maioria dos estudos selecionados e analisados a fundo foi avaliada como de alta qualidade.

Em relação a estes estudos, os resultados relatados na revisão mostraram efeitos positivos do uso de abordagem contextual em relação à aprendizagem conceitual, embora não tenha havido consenso quanto a isto, implicando na

necessidade de maiores esforços de pesquisa sobre este tema. Também não houve consenso sobre os efeitos da abordagem contextual quanto às atitudes dos estudantes em relação à ciência requisitando igualmente mais investigações. Entretanto, houve consenso quanto aos efeitos positivos do uso de história e filosofia da ciência na promoção de visões mais ‘amadurecidas’ sobre a natureza da ciência dos alunos. Logo, isto deve ser levado em consideração quando da elaboração de currículos e/ou estratégias de ensino que visem este objetivo. Também foram encontrados resultados favoráveis quanto aos efeitos do uso de abordagem contextual na promoção da capacidade de argumentação e metacognição, mostrando a potencialidade destes aspectos. Porém, foram poucos os trabalhos que lidaram com isto, o que remete à necessidade de mais pesquisas empíricas quanto a estes aspectos.

A revisão permitiu identificar várias formas de implementação de história e filosofia da ciência no ensino de física. A síntese das pesquisas mostrou que estas diferentes formas aparecem em três frentes:

- (i) em relação aos objetivos – o uso de história e filosofia da ciência no ensino de física pode servir para alcançar: entendimento conceitual, visões sobre a natureza da ciência, habilidade de argumentação, metacognição, atitudes em direção à ciência;
- (ii) em relação às estratégias de ensino – o uso de história e filosofia da ciência no ensino de física pode ser feito de maneira: integrada com o conteúdo de física, não-integrada com o conteúdo de física, integrada com outra estratégia de ensino;
- (iii) em relação aos materiais instrucionais – o uso de história e filosofia da ciência no ensino de física pode ser feito com auxílio de: narrativas históricas, artigos originais, biografias, réplicas de experimentos históricos, problemas historicamente contextualizados, vídeos, histórias curtas sobre a vida de cientistas.

Conforme os resultados relatados no trabalho, estas diferentes formas não são excludentes entre si e uma síntese como esta pode contribuir de forma significativa para auxiliar aqueles que lidam com o uso de história e filosofia da ciência no ensino de física seja na prática de ensino, seja na pesquisa em ensino de física com este tipo de abordagem.

A despeito desta revisão envolver somente artigos publicados em revistas de língua inglesa, há um natural interesse em também identificar a situação no contexto brasileiro. Assim, uma das projeções do presente trabalho é fazer um levantamento das pesquisas que investigam intervenções didáticas que usam história e filosofia da ciência em salas de aula de física, publicadas nas principais revistas brasileiras especializadas em ensino de ciências e ensino de física, mais uma importante revista da área em língua espanhola, incluída pela sua penetração na comunidade de pesquisadores em ensino de ciências no Brasil. Com procedimentos similares aos que foram usados no presente trabalho, a revisão com os estudos brasileiros já foi iniciada e resultados parciais foram apresentados na 1ª *Conferência Latinoamericana do International History, Philosophy, and Science Teaching Group* (1ª IHPST-LA) em 2010, no município de São Sebastião, São Paulo. Em futuro breve, este

estudo deverá ser concluído e apresentado à comunidade de professores e pesquisadores em ensino de física.

No terceiro capítulo foi apresentado um texto desenvolvido na forma de uma revisão do debate historiográfico entre I. Bernard Cohen e Richard S. Westfall sobre os caminhos científicos trilhados por Newton até este conceber a gravitação universal. Foram discutidas possíveis implicações do referido debate para o ensino de física em relação a três aspectos:

- (i) uma imagem de ciência mais apropriada em função de explicitar como Newton desenvolveu este conhecimento passando por várias transformações de pensamento ao longo de cerca de vinte anos. As diferenças nas interpretações instrumentalista e realista, atribuídas respectivamente a Cohen e Westfall, também são propícias para uma discussão epistemológica em sala de aula, o que pode contribuir para uma melhor compreensão sobre natureza da ciência;
- (ii) uma melhor compreensão conceitual sobre a gravitação universal por trazer à tona a importância de se compreender os conceitos de inércia e de força centrípeta para a compreensão da dinâmica orbital newtoniana. O debate também contribui para um apropriado entendimento conceitual do papel da terceira lei de Newton na dedução matemática da lei da gravitação universal;
- (iii) uma melhor habilidade de argumentação dos alunos em função de envolvê-los em atividades discursivas sobre controvérsias científicas.

Neste referido trabalho, foi discutido o desenvolvimento histórico-conceitual sobre a gravitação universal de Newton dentro da perspectiva de integrar o conjunto de materiais instrucionais que compõem a proposta didática. Assim, ele será objeto de avaliação em um futuro estudo que decorrerá de sua aplicação em sala de aula.

No quarto capítulo foi apresentado o estudo empírico da pesquisa. Este estudo tratou de analisar os efeitos da implementação de uma abordagem contextual de ensino em termos da qualidade da argumentação construída coletivamente sobre a síntese newtoniana usando, como instrumento de análise, o *layout* de argumentação de Toulmin. O trabalho apresentou como principais resultados:

- (i) a eficácia do modelo de Toulmin para avaliar a qualidade da argumentação coletiva;
- (ii) a importância das contribuições de cada grupo na construção da argumentação coletiva, acentuando o papel do trabalho colaborativo na construção social do conhecimento;
- (iii) os argumentos construídos coletivamente foram avaliados como satisfatórios, a despeito de algumas limitações;
- (iv) a influência do material instrucional, um texto de natureza histórica, na qualidade da argumentação;
- (v) o aparecimento de concepções próximas de visões pós-positivistas em parte da turma, como fruto das atividades realizadas em sala de aula.

Este estudo, a despeito de algumas limitações por ter sido inicialmente pensado para ser um estudo exploratório, projetou algumas possibilidades para futuras investigações. Um delas diz respeito à indagação sobre se existe – e qual seria – uma relação entre a qualidade das argumentações produzidas

coletivamente e externalizadas pelos alunos e a compreensão individual dos mesmos sobre o conteúdo tratado nas atividades em grupos.

Outra indicação para um futuro trabalho de pesquisa, uma vez que não foi objeto de estudo neste trabalho, diz respeito ao papel das interações sociais entre os sujeitos da pesquisa – seja entre próprios alunos, seja entre o professor e os alunos – na construção do argumento. O trabalho fez uma caracterização de como ocorreram as interações em sala de aula, mas não tinha como hipótese de trabalho avaliar a função destas interações na elaboração do argumento produzido coletivamente, logo este é um aspecto importante a ser investigado doravante.

Além disso, como na turma de 2008 da disciplina ‘Física Básica I’ da Licenciatura Noturna em Física da UFBA, já foi feita uma nova intervenção – inicialmente destinada a constituir o estudo definitivo da tese – com um conjunto de dados já coletados, através de vídeo- e áudio-gravações, questionários e provas; e com todas as transcrições já feitas, aguardando para análise, seguramente um próximo estudo será realizado para investigar os efeitos desta segunda intervenção que guarda algumas diferenças em relação à primeira conforme já foi explicitado na introdução da tese.

O capítulo cinco traz a proposta didática que é fruto, em grande medida, dos resultados oriundos dos três primeiros estudos. De acordo com a síntese das pesquisas, realizada no segundo capítulo, a proposta didática se situa como uma forma de usar uma abordagem contextual para alcançar melhor habilidade de argumentação e promover uma melhor imagem da ciência, com uma estratégia de ensino da gravitação universal de Newton de maneira integrada com seu desenvolvimento histórico e utilizando, como materiais instrucionais, textos na forma de narrativas históricas, além de textos sobre o modelo de argumentação de Toulmin. Um desses textos foi elaborado e apresentado no terceiro capítulo e o outro está inserido numa seção do próprio capítulo da proposta didática e, ambos, serão objetos de análise futura em termos da eficácia de sua aplicação em sala de aula. Além do que, a proposta foi elaborada como uma tentativa de aprimoramento das duas intervenções que foram desenvolvidas no contexto deste trabalho de tese – sendo que uma delas foi avaliada e apresentada no capítulo quatro e a outra foi excluída da tese para ser avaliada depois.

Portanto, um fruto imediato que decorre deste trabalho de doutorado é a perspectiva da aplicação de uma proposta didática voltada para o ensino da gravitação universal de Newton, orientado pela história e filosofia da ciência, com um enfoque em promover habilidade de argumentação aos alunos sobre a gravitação universal de Newton, conforme apresentada no capítulo cinco, e a necessidade de uma investigação sobre os efeitos pedagógicos decorrentes de sua aplicação em sala de aula.

Para finalizar, vale ressaltar os predicados do presente trabalho ao conseguir alcançar de forma exitosa os seus objetivos propostos, a despeito de considerar as limitações do trabalho. A revisão de literatura, nos moldes em que foi feita, resultou ser muito bem sucedida em fornecer uma compreensão

crítica e devidamente informada sobre a área de conhecimento cumprindo, assim, o primeiro dos objetivos específicos da tese. A controvérsia historiográfica envolvendo o processo de elaboração da gravitação universal de Newton, bem como o texto que discute e apresenta o *layout* de Toulmin de uma forma contextualizada, enquanto modelo apropriado de argumentação para o ensino das ciências, apresentaram qualidade satisfatória para serem usados como material instrucional da proposta didática e, assim, atingir o segundo e quarto objetivos específicos. De maneira similar, a análise da intervenção didática, apesar das suas limitações, foi bem sucedida ao realizar o terceiro objetivo por trazer à luz, resultados relevantes para a área de pesquisa sobre argumentação no ensino de ciências e, por fim, o quinto objetivo foi cumprido com a elaboração de uma proposta didática inovadora para ensinar a gravitação universal de Newton em sala de aula, visando promover uma melhor habilidade de argumentação nos alunos.

Anexo
Produtos da Tese

Produtos da Tese

Esta tese foi desenvolvida ao longo de um processo que, aos poucos, foi gerando produtos parciais que foram fundamentais na construção do próprio processo. Alguns destes produtos são listados a seguir.

Trabalhos apresentados em eventos científicos

Teixeira, E. S.; Freire, O. Um Estudo sobre a Influência da História e Filosofia da Ciência na Formação de Estudantes de Física. In: Resumos do XVII SNEF - Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2007, São Luis, 2007, p. 146-147.

Teixeira, E. S.; Silva, C. P.; Freire, O. Argumentação e Abordagem Contextual: Ensinando a Síntese Newtoniana. In: Anais do VI ENPEC - Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 2007, Florianópolis, 2007.

Freire, O.; Teixeira, E. S.; Silva, C. P. A Construção de uma Argumentação sobre a Síntese Newtoniana em uma Sala de Aula de Licenciatura em Física, a partir de uma Abordagem Contextual de Ensino. In: Livro de Resumos do XXV EFNNE - Encontro de Físicos do Norte e Nordeste, 2007, Natal, p. 207.

Teixeira, E. S.; Greca, I.; Freire, O. History and Philosophy of Science in Science Teaching: a Meta-Analysis. In: Proceedings of the International Congress of Science Education, Cartagena, Colombia, 2009, p. 179.

Greca, I.; Teixeira, E. S.; Freire, O. Uma Revisão Sistemática da Pesquisa sobre Uso de História e Filosofia da Ciência no Ensino de Física no Brasil. In: Resumos da 1ª Conferência Latinoamericana do International History, Philosophy, and Science Teaching Group (1ª IHPST-LA), 2010, São Sebastião, São Paulo, p. 46.

Teixeira, E. S.; Peduzzi, L. O. Q.; Freire, O. Os Caminhos de Newton para a Gravitação Universal: Uma Revisão do Debate Historiográfico entre Cohen e Westfall e suas Implicações para o Ensino de Física. In: Resumos da 1ª Conferência Latinoamericana do International History, Philosophy, and Science Teaching Group (1ª IHPST-LA), 2010, São Sebastião, São Paulo, p. 27-28.

Trabalhos publicados em periódicos

Teixeira, E. S.; Greca, I.; Freire, O. (2009). The History and Philosophy of Science in Physics Teaching: A Research Synthesis of Didactic Interventions. *Science & Education*. DOI 10.1007/s11191-009-9217-3.

Teixeira, E. S.; Silva, C. P.; Freire, O.; Greca, I. (2010). A Construção de uma Argumentação sobre a Síntese Newtoniana a Partir de Atividades em Grupos. *Investigações em Ensino de Ciências*, 15(1), 61-95.

Teixeira, E. S.; Peduzzi, L. O. Q.; Freire, O. (2010). Os Caminhos de Newton para a Gravitação Universal: Uma Revisão do Debate Historiográfico entre Cohen e Westfall. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27(2), 215-254.