

**ENFATIZANDO O ASPECTO PREDITIVO DA SEGUNDA LEI DE NEWTON:
ANÁLISE DE UMA EXPERIÊNCIA COM ALUNOS DO ENSINO MÉDIO
(Emphasizing the predictive aspect of Newton's Second Law:
analysis of an experience with students of secondary school)**

Rodolfo Alves de Carvalho Neto [diferencialpre@ig.com.br]

Colégio Antônio Vieira, Departamento de Física.

Av. Leovigildo Filgueiras, 683 – 40.1000-000 - Salvador - BA

Olival Freire Júnior [freirejr2001@yahoo.com.br]

Universidade Federal da Bahia, Instituto de Física.

Campus de Ondina - 40.170-115 - Salvador - BA

José Luís P. B. Silva [jose Luis@ufba.br]

Universidade Federal da Bahia, Instituto de Química.

Campus de Ondina - 40.170-115 - Salvador - BA

Resumo

Este artigo aborda os resultados de aprendizagem significativa acerca do aspecto preditivo da Segunda Lei de Newton e da limitação do determinismo clássico no domínio atômico. Estes resultados que integram dissertação de mestrado (Carvalho Neto, 2006) foram obtidos na pesquisa com alunos do terceiro ano do Ensino Médio do Colégio Antônio Vieira, Salvador, Bahia. Os dados da fase exploratória, obtidos em 2004, indicaram a necessidade de uma nova abordagem de Mecânica Clássica. Reformulou-se, em 2005, a abordagem desta teoria, explicitando o seu aspecto preditivo. Nessa perspectiva, foi discutida a possibilidade de prever, via Segunda Lei de Newton, resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido. Enfatizou-se a predição do estado clássico e da trajetória, no universo macroscópico, a partir das condições iniciais, em contraste com as predições quânticas no domínio atômico. Trata-se de uma pesquisa qualitativa, caracterizada como pesquisa-ação.

Palavras-chave: aspecto preditivo da física, determinismo, aprendizagem significativa.

Abstract

This paper deals with meaningful learning about the predictive feature of Newton's second law and restrictions to classical determinism in the atomic domain. Its results are part of a M.Sc. dissertation (Carvalho Neto, 2006) and come from a research with students from 3rd year at high school at the Colégio Antônio Vieira, in Salvador, Bahia, Brazil. Results from the exploratory stage, held in 2004, suggested the need of a new approach to Classical Mechanics. Thus, we changed the didactical presentation of this physical theory in order to emphasize its predictive nature. In this new approach we discussed the possibility of foreseeing, through Newton's second law, results from a measurement in a well-defined experimental context. We emphasized the prediction of the classical state and of the path of a system, in the macroscopic domain, in contrast to quantum predictions in the atomic domain. We have carried out the research as an action-research, thus, supported by a qualitative method.

Keywords: predictive features of physics, determinism, meaningful learning.

Introdução

Este artigo descreve parte de uma experiência didática que originou a dissertação de mestrado de um dos autores (Carvalho Neto, 2006). A necessidade de contrastar as bases conceituais da Mecânica Clássica com as da Mecânica Quântica motivou nova abordagem no ensino de ambas as teorias. Tomando por base a teoria da aprendizagem significativa (Ausubel; Novak & Hanesian, 1980; Moreira, 1983) buscou-se, desde o início, ancorar o conceito de predição física na idéia de previsão, já existente na estrutura cognitiva do aluno. Nessa perspectiva, ancorou-se as predições da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica, respectivamente, no subsunçor previsão-predição. Tais ancoragens buscaram dar uma estabilidade e clareza ao conceito de predição, subjacente à Física. De modo particular, enfatizou-se as predições da Mecânica Clássica e as predições irredutivelmente probabilísticas da Mecânica Quântica, mesmo para eventos individuais. O enfoque adotado, de acordo com a classificação proposta por Greca (2000), foi o de apresentar a Física Quântica sem elos de analogia com a Física Clássica. A nova abordagem de Mecânica Quântica e a discussão dos resultados, contudo, extrapolam os objetivos desta comunicação, e serão apresentadas em outra publicação.

A idéia de que os alunos, em geral, não compreendiam o aspecto preditivo da Segunda Lei de Newton foi amadurecida com a vivência em diversas escolas particulares de Salvador (Freire Jr. et al, 1995), ao longo de mais de uma década, e também no nível básico do ensino na graduação de Licenciatura em Física, das diversas Engenharias e áreas afins, na UFBA, como professor da disciplina Física Geral e Experimental II (parte teórica), durante semestres consecutivos. As funções horárias $x(t)$ e $v(t)$ dos diversos tipos de osciladores, pareciam, para os alunos desta disciplina, não ter correlação com a Segunda Lei de Newton, mesmo depois de terem cursado Física I, onde estudaram o Princípio Fundamental da Dinâmica. Isto foi observado ao longo de três semestres consecutivos da disciplina referida, com alunos dos cursos citados, quando estudavam Oscilações. Esta lacuna, particularmente no ensino da graduação, não decorria simplesmente da falta de estudo de cálculo diferencial e integral. Alguns alunos bem treinados nesse particular, não associavam, por exemplo, que a lei que prediz o estado clássico de um oscilador massa-mola, num dado instante (Segunda Lei de Newton), é a mesma lei que prediz a órbita elíptica dos planetas, levando em conta as condições iniciais e as particularidades dessas forças ($F=-Kx$ e $F=-GMm/r^2$), respectivamente. Esta deficiência apresentou-se, inclusive, de forma qualitativa.

Sabe-se que estes conteúdos se fazem presentes em muitos cursos do Ensino Médio, mas os alunos não associam, mesmo de modo qualitativo, a segunda lei de Newton à obtenção de uma trajetória, a partir das condições iniciais. Os cursos de Ensino Médio não têm contribuído para a compreensão do aspecto preditivo da Mecânica Clássica. Acrescente-se, ainda, que as “máquinas de Atwood”, “planos inclinados”, “elevadores”, aparecem, numa abordagem tradicional, como se fossem “assuntos” reduzidos a uma cinemática, desconectados de qualquer reflexão em torno do Princípio Fundamental da Dinâmica e do determinismo clássico implícito nesta lei. O hábito, por parte dos alunos do Ensino Médio, de tratar de fenômenos físicos envolvendo partículas sob a ação de uma força resultante constante, costuma provocar uma “cinematização” da Dinâmica. (Carvalho Neto; Freire Jr. & Rocha, 1999). É muito comum, por exemplo, o aluno do Ensino Médio não fazer qualquer associação, mesmo qualitativa, entre a segunda lei de Newton e as funções $x(t)$ e $v(t)$ do movimento harmônico simples. Os assuntos aparecem e são tratados como “blocos fragmentados” que, via de regra, são memorizados. Esse enfoque não permite, ulteriormente, compreender o

Princípio da Incerteza como uma quebra do determinismo implícito na Segunda Lei de Newton. (Carvalho Neto; Freire Jr. & Rocha, 1995).

Uma observação mais sistemática acerca da compreensão do aspecto preditivo da Segunda Lei de Newton só ocorreu em 2004 e 2005, em pesquisa realizada no terceiro ano do Colégio Antônio Vieira (CAV). O determinismo clássico, para este mesmo público, mostrou não estar suficientemente esclarecido. Os alunos não reconheceram, inicialmente, haver uma limitação fundamental no uso do conceito de trajetória no domínio atômico e sub-atômico. Decidiu-se, então, elaborar uma proposta didática, visando a apresentar o aspecto preditivo das teorias físicas para esses alunos. Pretendia-se, portanto, com esta nova abordagem, explicitar uma característica central das teorias da Física, a predição, que expressa a possibilidade de prever resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido (Osnaghi, 2006).

A opção pela valorização da predição como uma característica central das teorias físicas decorreu tanto de nossa insatisfação com a observação de que os alunos não reconhecem essa característica quando aprendem a dinâmica clássica quanto, como apontado anteriormente, da necessidade de identificarmos subsunçores adequados a uma seqüência didática, visando a facilitar a aprendizagem significativa de noções elementares da teoria quântica. A opção feita, contudo, está longe de ser trivial, e merece ser justificada. De fato, a pesquisa contemporânea em ensino de ciências, influenciada pelas correntes pós-positivistas da filosofia da ciência, não favorece naturalmente a opção feita. Laudan e colaboradores, revisando as contribuições de autores como N. R. Hanson, S. Toulmin, I. Lakatos, P. Feyerabend, o próprio L. Laudan, e acima de tudo T. S. Kuhn, não estabelecem a preditividade das teorias como uma característica consensual entre os filósofos analisados, mas apenas nas propostas de I. Lakatos (Laudan; Donovan & Laudan, 1993); seguramente Laudan incluiria as propostas de Karl Popper se tivesse incluído a falseabilidade popperiana (Popper, 1972) entre as contribuições revisadas. Nossa opção pela valorização da predição como uma característica central das teorias físicas resultou, portanto, mais dos objetivos educacionais adotados que de um suposto consenso na filosofia da ciência.

Buscou-se, de modo específico, ensinar que o estado clássico de uma partícula macroscópica e sua evolução temporal podem ser previstos mediante a Segunda Lei de Newton, a partir das condições iniciais. Desse modo, enfrentou-se uma questão central da Mecânica Clássica: a obtenção das trajetórias a partir da equação fundamental do movimento.

Os antecedentes relatados foram partes integrantes do processo de construção das condições, para que o desafio de responder ao problema proposto fosse assumido de forma consequente.

O Problema de Pesquisa que se colocou, então, foi: É possível facilitar, para estudantes de Ensino Médio, a aprendizagem significativa do aspecto preditivo da Segunda Lei de Newton e a limitação do determinismo clássico no mundo atômico e sub-atômico?

Objetivos

Em vista do Problema de Pesquisa formulado acima, este estudo teve como objetivo geral, o mais abrangente, realizar uma experiência de ensino que explicita e enfatize o aspecto preditivo

da Segunda Lei de Newton e a limitação do determinismo clássico no domínio atômico e sub-atômico, de modo a facilitar a aprendizagem significativa deste conteúdo no Ensino Médio.

Como objetivos específicos, foram propostos: a) descrever a estrutura cognitiva de alunos do terceiro ano do Colégio Antônio Vieira (CAV) em torno do significado da predição da Segunda Lei de Newton, mediante pré-testes e entrevistas semi-estruturadas; b) elaborar, implementar e avaliar uma estratégia didática para abordagem de Mecânica Clássica, a partir da aprendizagem significativa dos alunos pesquisados sobre conceitos do aspecto preditivo da segunda Lei de Newton.

Desenho do estudo, material e métodos

Tratando-se de uma pesquisa qualitativa (Bogdan & Biklen, 1994), de caráter descritivo-analítico, visou-se intervir em situações percebidas passíveis de evolução conceitual, onde pesquisador e pesquisados assumem voluntariamente uma posição reativa. São também chamados de pesquisa-ação-intervenção os estudos assim caracterizados. Por outro lado, é necessário destacar o aspecto interpretativo da pesquisa, pois as entrevistas foram analisadas e interpretadas.

Considerando que o processo de pesquisa qualitativa pressupõe que há diferentes possibilidades de programar sua execução, foram planejados dois momentos de trabalho distintos, mas correlacionados internamente. O primeiro momento, realizado em 2004, pode ser definido como a fase exploratória da pesquisa, porque teve como finalidade identificar idéias pré-existentes na estrutura cognitiva dos alunos, sobre o aspecto preditivo da Mecânica Clássica e sua limitação no domínio atômico e sub-atômico. Para tanto, empregamos questões escritas (teste escrito) e entrevistas gravadas em vídeo.

O teste escrito constou de vinte questões e foram aplicados a todos os estudantes do terceiro ano do Ensino Médio.

As entrevistas realizadas na fase exploratória tomaram como base as perguntas formuladas no teste escrito. Buscou-se coletar, através da discussão, informações mais detalhadas e significativas acerca do aspecto preditivo da Segunda Lei de Newton. Cada uma das entrevistas durou entre 30 e 60 minutos.

Foram entrevistados 5 (cinco) estudantes, que se ofereceram como voluntários para participara da pesquisa. As entrevistas foram numeradas de 1 a 5, e os alunos foram arbitrariamente codificados como A1, A2 e assim sucessivamente, seguidos de 2004, ano da coleta do material lingüístico. O código A1-2004-a, por exemplo, indica o aluno nº 1 do ano letivo 2004, na fase exploratória, anterior à experiência de ensino.

Na segunda fase, que ocorreu em 2005, realizou-se a experiência de ensino. Tal intervenção teve como objetivo a aprendizagem do significado da predição subjacente à Física e dos conceitos físicos necessários para operacionalizar a predição no âmbito da Mecânica Clássica.

Foi elaborada uma nova abordagem da Mecânica Clássica (descrita adiante), empregada com todos os alunos do terceiro ano do Ensino Médio. Antes e após o ensino foi aplicado um teste escrito igual ao realizado na fase exploratória. Após a experiência de ensino foi repetido o teste

escrito e realizada uma entrevista com três alunos que se apresentaram como voluntários. Utilizou-se código similar ao do ano de 2004 para identificar cada aluno entrevistado, por exemplo: o código A1-2005-a indica o aluno A1 na fase de intervenção (que ocorreu em 2005), em situação anterior (a) ao ensino; ao passo que A1-2005-p indica o mesmo aluno (A1), nessa mesma fase, em situação posterior (p) ao ensino.

A seguir serão destacadas as principais informações acerca do que os alunos pensam sobre o determinismo implícito na Segunda Lei de Newton e o conceito de trajetória, colhidas através dos testes escritos e das entrevistas prévias ao ensino.

Resultados da fase exploratória

A análise e interpretação das informações obtidas na fase exploratória tiveram como objetivo compreender criticamente as concepções prévias dos alunos em torno de dois eixos temáticos: 1) a característica preditiva das teorias físicas e, de modo particular, da Mecânica Clássica e 2) o determinismo clássico implícito na Segunda Lei de Newton e o conceito de trajetória.

As respostas ao teste escrito revelaram que, embora os alunos tenham em sua estrutura cognitiva a idéia estável, clara e organizada de previsão como empregada no senso comum — a exemplo de que é possível prever se amanhã vai chover — não estavam conscientes de que a predição é uma característica das teorias físicas.

Observou-se, de modo quase generalizado, uma aprendizagem automática da Segunda lei de Newton, sem apropriação do determinismo clássico implícito nessa lei. Este princípio é “compreendido”, como se fosse uma “regra”, pura e simplesmente, para cálculo de acelerações de forças ou de massa inercial. O aluno A5-2004-a, por exemplo, radicalizou esta idéia tanto no pré-teste como na entrevista prévia, afirmando que a Segunda Lei de Newton só é aplicável aos movimentos uniformemente variados.

Uma parcela razoável dos alunos afirmou, de modo explícito, não reconhecer ligação entre o princípio fundamental da Dinâmica e a descrição do movimento do cometa Halley. Esses alunos não se apropriaram da noção de que é através da Segunda Lei de Newton que se pode descrever a evolução temporal do estado de uma partícula macroscópica, (trajetória) seja ela uma partícula numa máquina de Atwood, seja um planeta ou um cometa. Esta falta de entendimento revelou-se de forma qualitativa, já que estudantes do Ensino Médio não dispõem das ferramentas do cálculo diferencial e integral.

O aluno A3-2004-a, a exemplo de outros alunos pesquisados, reconhece, de certo modo, haver uma interligação entre a Segunda Lei de Newton e o conceito de trajetória:

... trajetória depende da direção e sentido do movimento e o vetor força resultante pode nos ajudar a saber isto. Admita que um corpo descreve uma trajetória circular. Certamente que existe uma força centrípeta e aceleração centrípeta que são cruciais para manter o corpo na trajetória e impedi-lo de sair pela tangente, o que alteraria a trajetória. Portanto, a Segunda Lei de Newton tem grande relação com o conceito de trajetória.

Note-se que, embora esta resposta seja correta, o aluno não explicita como as trajetórias podem ser obtidas a partir da segunda lei de Newton. O estudante A5-2004-a, por sua vez, referindo-se à equação fundamental da Dinâmica, afirma que "... com essa lei, a trajetória do objeto não pode ser calculada", o que é um equívoco.

Do mesmo modo equivocadamente o aluno A4-2004-a declarou não haver ligação do conceito de trajetória com a segunda lei de Newton. Um outro aluno perguntou: "qual é o conceito de trajetória?". De modo similar, o aluno A4-2004-a declarou: "... a interligação de trajetória existe, apesar de eu não saber explicá-la". Registre-se ainda que esse aluno não se refere, em momento algum, que uma trajetória bem definida pressupõe uma definição simultânea das grandezas posição e velocidade. Ele abstrai o conceito de velocidade e declara que uma posição bem definida é suficiente para legitimar o conceito de trajetória.

Este é um resultado que tem um significado importante: compreender as relações de incerteza, posteriormente, como ruptura com o conceito de trajetória é algo que exige uma abordagem da Mecânica Clássica que evidencie que a definição isolada de posição não garante uma trajetória bem definida. Quando se prepara um sistema quântico para medir a sua posição, por exemplo, perde-se a definição da velocidade, limitando, neste suposto fenômeno, o uso do conceito de trajetória. Há, finalmente, uma concepção prévia praticamente consensual, por parte desses cinco alunos, de que as trajetórias dos elétrons estão bem definidas e desconhecidas. Há, portanto, um conhecimento inadequado acerca das limitações do determinismo em escala atômica e sub-atômica. O aluno A3-2004-a, por exemplo, ao ser perguntado se o elétron pode ser descrito como bolinha em miniatura, declara que sim. O mesmo aluno, anteriormente, ao ser perguntado se a posição e velocidade de um elétron estão simultaneamente bem definidas, afirma que sim.

Os resultados das observações feitas nesta fase, considerando os diferentes instrumentos aplicados, foram:

- a idéia de que a Segunda Lei de Newton permite prever resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido não aparece em momento algum;
- a maioria dos alunos não possuía, previamente, o conhecimento das descrições determinísticas que a Segunda Lei de Newton fornece. Não reconheciam, portanto, que o Princípio Fundamental da Dinâmica lida com a obtenção de trajetórias;
- o aluno, inadequadamente, não percebe limitação alguma quanto ao uso simultâneo dos conceitos de espaço e velocidade (trajetória) no mundo atômico e sub-atômico.

Os problemas identificados na fase exploratória, sua avaliação e elaboração de hipóteses explicativas, foram determinantes para definir diretrizes e estratégias de ação que respondessem ao problema de pesquisa através de uma nova abordagem de Mecânica Clássica. O aluno A1-2005-a, contudo, busca tratar do determinismo no contexto das humanidades, mas também não explicita de que modo a Mecânica Clássica fornece uma descrição temporal de posição e velocidade, nem sequer de modo qualitativo. O recorte a seguir, em entrevista concedida pelo aluno A1-2005-a é pertinente a esse respeito e servirá de ilustração.

P: ... Eh... eu queria que você me dissesse o que é que você entende por determinismo e por uma coisa não determinística. Vamos começar por o que é que você entende por uma descrição determinística?

A: Determinismo são teorias sociais.

P: Você estudou aonde?

A: Em Geografia.

Os pré-testes e as entrevistas prévias de 2005 não evidenciaram nenhum dado novo.

Este inventário/síntese do conhecimento prévio dos alunos sobre o assunto foi fundamental para a definição das estratégias para o segundo momento, em 2005, tendo em vista a busca de resposta para o problema de pesquisa formulado.

A nova abordagem da mecânica clássica implementada em 2005

Apoiado na Teoria da Aprendizagem Significativa, iniciou-se o curso com a idéia, mais inclusiva e geral, de que a Física é uma ciência essencialmente preditiva. Buscou-se ensinar que as teorias físicas podem, em princípio, prever resultados de medidas em um contexto experimental bem definido. A necessidade de explicitar e enfatizar o aspecto preditivo da Segunda Lei de Newton exigiu um planejamento pedagógico e elaboração de material didático para todos os alunos de terceiro ano do CAV de 2005. A finalidade do material foi a de facilitar a aprendizagem significativa em torno do aspecto preditivo da Segunda Lei de Newton e do determinismo clássico implícito nesta lei. Esta visão do determinismo aparece, no século XVIII, como símbolo máximo de um pensamento mecanicista, através do matemático Laplace. Era necessária uma estratégia específica para ensinar de que forma os conceitos da Mecânica de Newton fazem previsões, bem como asseguram, em princípio, o determinismo. O texto elaborado e utilizado em sala representou um convite para a construção de uma ponte cognitiva que interligasse o que o aluno já sabia e o que precisava saber para construir, no contexto científico, significados acerca do aspecto preditivo da Mecânica de Newton e do determinismo clássico. Não se buscou simplesmente uma mudança conceitual, mas sim uma evolução conceitual (Mortimer, 1994).

Examinou-se o significado do termo previsão tal como aparece nos dicionários: “ato ou efeito de prever” (prever: “dizer antecipadamente”) (Aurélio, 1999, p.1625) , “ato ou efeito de prever, de afirmar o que vai acontecer no futuro” (prever: “dizer antecipadamente”) (Houaiss & Villar, 2001, p.2283).

Procurou-se criar um texto que pudesse tornar ainda mais estável o conhecimento prévio dos alunos acerca de previsão como subsunção para a aprendizagem pretendida. A previsão do tempo — bom, nublado, chuvoso etc. — foi idéia âncora específica a partir da qual procurou-se desenvolver, por aprendizagem superordenadora, a idéia mais geral de previsão. Enfatizou-se que os serviços meteorológicos empregam a Física em suas previsões, destacando-se que a atmosfera é um sistema demasiadamente complexo para que as previsões sejam muito precisas. Discutiu-se, ainda, que insuficiência de informações, e/ou sensibilidade às condições iniciais, e/ou limitações

nos recursos computacionais, e/ou erros de medidas e suas propagações não retiram das teorias físicas o seu aspecto intrinsecamente preditivo.

Registrou-se, também, com base em exemplos de previsões elaborados pelos alunos nas entrevistas, o trágico Tsunami que abalou o sudeste asiático, como fenômeno cuja predição está no domínio da Física, em parceria com a Geologia. Assim, mesmo com um monitoramento capaz de antever um evento deste tipo, a elevada intensidade das ondas sísmicas surpreendeu àqueles que estudam fenômenos com este nível de complexidade, onde estão presentes movimentos das massas tectônicas.

Ao falar em predição, no terreno da Física, procurou-se refletir, de maneira problematizadora, sobre uma pergunta mais geral: o que prevêem as teorias físicas? Sucessivas reflexões culminaram com a idéia de que teorias físicas prevêem resultados de medidas em um contexto experimental bem definido. Problematizou-se também perguntando: qual a questão central da Mecânica Clássica?

Ensino e prática: como os conceitos implícitos no aspecto preditivo da Mecânica Clássica surgiram em sala de aula

A experiência de ensino empregando essa nova abordagem se estendeu por três meses. Neste intervalo de tempo, questões de aplicação foram resolvidas enfatizando o aspecto preditivo da Mecânica Clássica, por exemplo, problemas envolvendo o ajuste das condições iniciais no movimento harmônico simples. Os problemas que envolviam as funções horárias do movimento uniforme e do movimento uniformemente variado foram tratados como casos particulares de soluções advindas da Segunda Lei de Newton.

Insistiu-se, ao longo da nova abordagem, na seguinte pergunta: de que forma, explicitamente, o conjunto de todos os estados de uma partícula clássica (trajetória) pode ser predito a partir do estado inicial ou condições iniciais? A pergunta anterior remete a algo mais específico: de que forma passa-se do conhecimento do estado inicial para o conhecimento do estado seguinte, infinitamente próximo, e assim sucessivamente? Essa busca de resposta para compreender o aspecto preditivo da Mecânica Clássica, equivale a compreender o significado físico da Segunda Lei de Newton.

O material elaborado para responder a esta questão pode ser sintetizado no mapa conceitual juntamente com as noções de aceleração instantânea e de velocidade instantânea, conforme mostrados a seguir.

A resposta à questão de como se passa do conhecimento do estado inicial para o conhecimento do estado seguinte, infinitamente próximo, e assim sucessivamente, pode ser obtida utilizando-se a Segunda Lei de Newton, a equação do movimento, para determinar o vetor aceleração média relativo a um curtíssimo intervalo de tempo, após o instante inicial do movimento. Daí se obtém a variação do vetor velocidade (módulo, direção e sentido), que permitirá o conhecimento dos vetores posição e velocidade, ao final deste mesmo intervalo de tempo, e assim sucessivamente. Desse modo, pode-se prever o conjunto de todos os estados (posições e velocidades), ou seja: a trajetória. Quanto menor o intervalo de tempo decorrido entre a medição de

um estado e do próximo, mais preciso será o cálculo, pois mais próximos estarão os valores médios dos valores instantâneos das referidas grandezas. Embora apenas o cálculo diferencial e integral permita operacionalizar os conceitos de aceleração instantânea e velocidade instantânea, tal fato não impediu a abordagem aproximada descrita anteriormente.

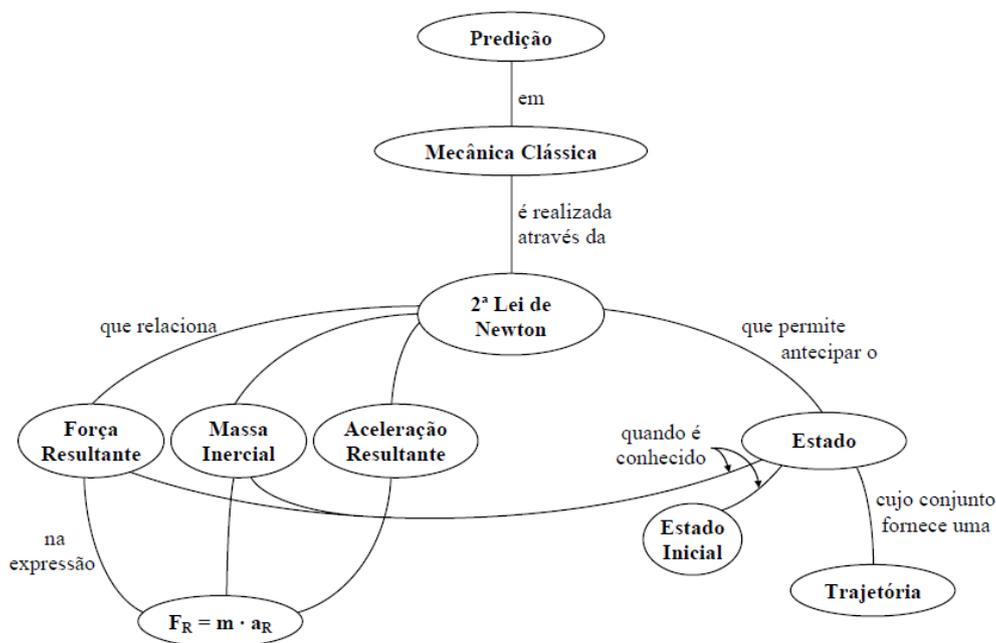


Figura 1 – Mapa conceitual do aspecto preditivo da Mecânica Clássica.

Levando em conta que os alunos desconheciam os principais êxitos da Mecânica Clássica decidiu-se, através da nova abordagem, contextualizar a descoberta de Netuno, explicitando os conceitos da Mecânica Clássica que permitiram tal predição, conforme indica o mapa conceitual. Essa descoberta foi abordada, inicialmente, com enfoque histórico (Freire & Carvalho Neto, 1997). Enfatizou-se, em seguida, que a lei que prediz a posição e a velocidade de uma partícula sujeita a uma força constante (Segunda lei de Newton) pode também prever essas variáveis num caso geral, no domínio macroscópico. Buscou-se, desta forma, conectar a cinemática com a Dinâmica, superando “a cinematização da Dinâmica”. A abordagem feita interligou os conceitos necessários à operacionalização da predição clássica, levando em conta, também, a Lei da Gravitação Universal. O enfoque foi qualitativo, em virtude do aluno não possuir a ferramenta do cálculo diferencial e integral.

O curso de Mecânica Clássica culminou com a idéia de que o modelo planetário é inadequado para tratar dos fenômenos atômicos. A ênfase girou em torno da idéia de que há uma limitação fundamental no uso simultâneo dos conceitos de posição e velocidade e, portanto, no conceito de trajetória, quando esses conceitos são aplicados em escala atômica. Não há sentido falar em condições iniciais no contexto atômico e sub-atômico. Há uma limitação fundamental da Segunda Lei de Newton no domínio atômico e sub-atômico.

Aprendizagem significativa do aspecto preditivo da Segunda Lei de Newton

A consciência da possibilidade de prever o estado clássico de uma partícula macroscópica, a partir do estado inicial (condições iniciais), mediante a Segunda Lei de Newton, foi um resultado que apareceu nas entrevistas de dois dos três alunos, após a nova abordagem de Mecânica Clássica. Como evidência desta aprendizagem significativa, um recorte da entrevista concedida pelo aluno A2-2005-p será apresentado a seguir. Convém observar que este aluno explicita de que forma a Segunda Lei de Newton e conceitos desta teoria científica são utilizados na operacionalização das previsões da Mecânica Clássica. Vejamos:

P: Vamos voltar um pouquinho agora, e falar da... da... da Mecânica de Newton. Eu queria que você me dissesse de que forma é que você pode, através da Mecânica de Newton. Eh!... prever estados clássicos?... Como é que funciona esse esquema preditivo da Mecânica Clássica?

A: Bom, em relação às forças que atuam no corpo, força... Eh!... a Segunda Lei de Newton, que diz que força é o produto da massa vezes pela aceleração, eu acho que através dessa expressão, você pode prever todas... e através... da posição e da velocidade inicial, você pode prever os estados da partícula em determinado instante. Porque a aceleração tá relacionada com a variação da velocidade em relação ao tempo e a velocidade com a variação do espaço em relação ao tempo. Então você pode relacionar a Segunda Lei de Newton com a posição e o tem... e o tempo e a... o... e a velocidade.

Uma integração qualitativa de dados levou em conta ainda que o aluno A2-2005-p e os outros dois (A1-2005-p e A3-2005-p) reconheceram, no pós-teste e nas entrevistas finais, que o determinismo sempre associa, para um corpo macroscópico, uma posição e velocidade bem definidas, mesmo que os valores correspondentes a essas grandezas não sejam conhecidos. Reconheceram, como consequência, que movimentos macroscópicos de difícil previsibilidade são descritos de modo determinístico, ainda que sejam, às vezes, extremamente sensíveis às condições iniciais. Reconheceram, finalmente, haver uma limitação fundamental de uso simultâneo das grandezas posição e velocidade simultaneamente no domínio atômico e sub-atômico, ou seja, uma limitação ao conceito de trajetória na descrição de fenômenos dentro deste domínio. O recorte que segue (com A2-2005-p) é uma evidência desta conclusão.

A: Certo. Ham, ham. Algu/... algumas coisas que eu... que o material trata eu já tinha alguma... uma certa noção. Não bem esclarecida na minha cabeça, mas meio confuso, mas eu já tinha certa noção. E o material serviu pra... pra esclarecer isto... algumas coisas... sistematizar... Eh... ti... preencher as lacunas que haviam. Como, por exemplo, a... o caos determinístico, não ser uma... uma limitação propriamente da Física, mas sim dos recursos tecnológicos do homem, da falta de informação. E eu tinha uma certa noção disso, mas não sistematizado como foi apresentado na lista. E outras coisas, também, como o movimento do elétron, eu não tinha conhecimento nenhum. Pra mim o movimento do elétron era aquele movimento clássico do núcleo no meio e a trajetória bem definida e orbitais em volta... a trajetória bem definida era um conceito que eu tinha antes do material. O material serviu pra desconstruir essa idéia. O elétron não tem a trajetória bem definida.

Este mesmo aluno, A2-2005-p, do mesmo modo que o A1-2005-p, ao ser perguntado sobre como prever o estado de uma partícula, a partir do estado inicial, consegue, ao longo do diálogo, explicitar uma resposta adequada.

P: Bom, então me diga assim de uma maneira, agora, mais enxuta, como é que você prediz o estado de uma partícula a partir de um estado inicial?

A: A partir das forças que você conhece a cada instante...

P: Hum?!

A: ... atuando na partícula. Usando a Segunda Lei você obtém as acelerações...

P: Pra isso você precisa saber o quê? Antes... Na hora de fazer esta conta? Na hora de você usar a Segunda Lei de Newton?

A: A massa inercial. Com as forças e a massa inercial você obtém as acelerações instantâneas a cada instante. E com as acelerações você obtém a variação da velocidade naquele instante. E com a variação da velocidade você calcula o estado... o estado da partícula.

Percebeu-se, então, uma adequada compreensão do aspecto preditivo da Mecânica Clássica e do determinismo implícito na Segunda Lei de Newton no universo dos alunos pesquisados. Uma consequência desta aprendizagem significativa foi a tomada de consciência de que os fenômenos macroscópicos de difícil previsibilidade são passíveis, em princípio, da previsibilidade oferecida pela Mecânica Clássica. Acrescente-se, finalmente, a compreensão adequada de que as limitações das descrições determinísticas em escala atômica e sub-atômica expressam uma limitação fundamental de uso do conceito de trajetória neste domínio.

Conclusão

A investigação buscou esclarecer, como resposta para o problema de pesquisa formulado, a possibilidade de introduzir, no Ensino Médio, o aspecto preditivo da Mecânica Clássica, conforme descrito na introdução. Sumarizando as conclusões já descritas anteriormente destaca-se como principal resultado da pesquisa a aprendizagem significava acerca do aspecto preditivo da Mecânica Clássica. Isso permitiu, a nosso ver, uma reflexão mais crítica acerca do determinismo clássico implícito na Segunda Lei de Newton. Recomenda-se outras investigações a fim de observar em que outros contextos pode haver adequação da proposta aqui descrita.

Referências

Ausubel, D. P.; Novack, J. D. & Hanesian, H. (1980). *Psicologia educacional*. Tradução Eva Nick. Rio de Janeiro: Interamericana.

Bogdan, R. & Biklen, S. (1994). *Investigação qualitativa em educação: uma introdução à teoria e aos métodos*. Tradução Maria João Alvarez, Sara Bahia dos Santos e Telmo Mourinho Baptista. Porto: Porto Editora.

Carvalho Neto, R. A. (2006). *Aspecto preditivo da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica: uma Proposta Teórico-Metodológica para Alunos do Ensino Médio*. Dissertação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.

Carvalho Neto, R. A.; Freire Jr. O. & Rocha, J. F. M. (1995). *O princípio de Heisenberg na escola secundária*. In: Castilho, C. M. (Ed.) XIII Encontro de Físicos do Norte e Nordeste, Salvador: 1995. Resumos... Salvador: SBF/UFBA, p. 54.

Carvalho Neto, R. A.; Freire Jr. O. & Rocha, J. F. M. (1999). Revelando o caráter determinístico da Mecânica Newtoniana: Uma ponte para o Ensino da Física Moderna no Ensino Médio. *Ideação*, 3, 51-68.

Ferreira, A. B. H. (1999). *Novo Aurélio século XXI: o dicionário da língua portuguesa*. 3. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira.

Freire Jr. O.; Carvalho Neto, R. A.; Rocha, J. F. M.; Vasconcelos, M. J. L.; Socorro, M. S. & Anjos, E. L. (1995). *Introducing Quantum Physics in Secondary School*. In: Finley, F.; Allchin, D. Rhees, D. & Fifield, S. (Eds.) Third International History, Philosophy and Science Teaching Conference – Minnesota, Minneapolis, U.S.A.: 1995. Proceedings... Minneapolis: University of Minnesota, v. 1, p. 412- 419.

Freire Jr., O. & Carvalho Neto, R. A. (1997). *O universo dos quanta: uma breve história da Física Moderna*. São Paulo: FTD.

Greca, I. M. R. (2000). *Construindo Significados em Mecânica Quântica: resultados de uma proposta didática aplicada a estudantes de Física Geral*. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Houaiss, A. & Villar, M. S. (2001). *Dicionário Houaiss da língua portuguesa*. 1. ed. Rio de Janeiro: Objetiva.

Laudan, L.; Donovan, A. & Laudan, R. (1993). Mudança científica: modelos filosóficos e pesquisa histórica. *Estudos Avançados*, 7(19), 7-89.

Moreira, M. A. (1983). *Uma abordagem cognitivista ao ensino da Física*. Porto Alegre: EDUFRGS.

Mortimer, E. F. (1994). Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: para onde vamos? *Investigações em Ensino de Ciências*. Acesso em 15 jun., 2008, http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID8/v1_n1_a2.pdf

Osnaghi, S. (2005). A Dissolução Pragmático-transcendental do “Problema da Medição” em Física Quântica. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, série 3, 15(1) 79-125.

Popper, K. (1972). *Lógica da pesquisa científica*. São Paulo: Cultrix.